



\*PI 00150061\*  
\*PI 00150061\*

**REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL**  
MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR  
**INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL**

## CARTA PATENTE Nº PI 0015006-1

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE DE INVENÇÃO, que outorga ao seu titular a propriedade da invenção caracterizada neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

(21) Número do Depósito: PI 0015006-1

(22) Data do Depósito: 13/10/2000

(43) Data da Publicação do Pedido: 26/04/2001

(51) Classificação Internacional: G06F 17/50; G06T 17/20; B29C 45/17

(30) Prioridade Unionista: 15/10/1999 AU 60/159,552

(54) Título: MÉTODO, APARELHO E MÍDIA PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO

(73) Titular: MOLDFLOW PTY LTD., Empresa Australiana. Endereço: 259-261 Colchester Road, Kilsyth, Austrália (AU), CEP: VIC 3137.

(72) Inventor: ZHI LIANG FAN; RONG ZHENG; PETER KENNETH KENNEDY; HUA GANG YU

Prazo de Validade: 10 (dez) anos contados a partir de 02/06/2015, observadas as condições legais.

Expedida em: 2 de Junho de 2015.

Assinado digitalmente por:

**Júlio César Castelo Branco Reis Moreira**  
Diretor de Patentes



"MÉTODO, APARELHO E MÍDIA PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO."

A invenção se refere a um método e a um aparelho para a análise estrutural de componentes, de aplicação particular, porém de maneira alguma exclusiva na determinação da deformação e na distribuição da tensão dentro de um objeto que fica sujeito a cargas, especialmente na análise de peças moldadas a injeção para determinar a sua deformação e níveis de tensão sob carga externa ou interna.

A presente invenção tem a sua aplicação mais particular na análise estrutural de estruturas de paredes finas, cuja característica geométrica mais importante é que uma dimensão, a espessura, é pelo menos diversas vezes menor do que as duas outras dimensões. Os exemplos de tais estruturas são peças de metal moldadas a injeção, material de cerâmica ou polimérico, peças fundidas de metal e estruturas formadas de metal em folha.

Os fabricantes de componentes e peças, particularmente através de moldagem a injeção, preferem fazer a análise estrutural das peças a montante no processo do projeto a fim de reduzir custos e o tempo até o mercado. A fim de satisfazer a demanda dos engenheiros projetistas, os produtos existentes integram a análise finita de elementos (FEA), e a Computer Aided Drafting (CAD). Os pacotes de modelagem de sólidos das marcas Pro-Engineer (marca de indústria e comércio), CATIA (marca de indústria e comércio), IDEAS (marca de indústria e comércio), Solid Works (marca de indústria e comércio) e Solid Edge (marca de indústria e comércio) são normalmente utilizados no projeto e desenho mecânico. Esses pacotes podem ser utilizados para gerar descrições tridimensionais, fotorrealistas (conhecidas como modelos sólidos) da geometria de componentes. Atualmente, os pacotes de análise estrutural baseados diretamente em modelos sólidos utilizam elementos sólidos tais como os tetraedros e os hexahedros.

Para a análise estrutural de modelos sólidos, a região definida pelo modelo sólido é dividida em uma pluralidade de pequenos elementos denominados elementos sólidos. Esse processo é denominado entrelaçamento e a coleção resultante de elementos sólidos é denominada uma malha sólida.

5 Os elementos sólidos são geralmente sólidos geométricos simples tais como os tetrahedros ou os hexahedros. A geração da malha sólida foi aperfeiçoada recentemente, embora para as peças complexas ela seja raramente automática. Frequentemente o usuário vai precisar remover as características do modelo sólido para permitir que a malha seja gerada com sucesso. Isto pode consumir  
10 muito tempo e em casos extremos pode requerer a remodelagem do componente ou de alguma região do componente.

O emprego de elementos sólidos não tem nenhuma vantagem teórica em relação ao emprego de elementos ocos para estruturas de paredes finas, pelo menos na determinação da resposta estrutural do componente sob  
15 uma carga. Entretanto, a maior parte da modelagem do componente é feita em sistemas de modelagem de sólidos, de modo que o emprego de elementos sólidos é mais natural e permite uma interface melhor entre o modelo sólido geométrico e a malha utilizados para a análise. Ocorre um problema particular com componentes que são de paredes finas. Neste caso, para conseguir  
20 resultados precisos, tem sido necessário se assegurar que haja diversos elementos sólidos bem moldados na direção da espessura. Isto conduz a um grande número de elementos no modelo, e portanto longos períodos para a computação e grandes requisitos de memória. Embora seja possível utilizar um elemento de uma ordem mais elevada para reduzir o número de elementos  
25 através da espessura, a geração automática de tal malha ainda é difícil. Para reduzir o tamanho de modelos de elementos sólidos grandes, o usuário pode aumentar a dimensão do elemento característico e reentrelaçar a geometria. O gerador automático de malhas vai gerar então poucos elementos, mas a malha

de elemento finito resultante pode não ser capaz de modelar a distribuição da tensão real, devido a muito poucos elementos. Além disso, uma malha de elemento sólido com um número insuficiente de elementos através da espessura apresenta outros problemas, tais como uma matriz de rigidez mal condicionada, travamento de cisalhamento e fraca simulação da resposta estrutural de flexão pura e dominada pela flexão. Estes podem afetar seriamente a confiabilidade da análise finita de elementos.

As estruturas de paredes finas consistem tipicamente em componentes de placa e ocos. Existem diversas teorias clássicas para placas e elementos ocos. São particularmente bem conhecidas a teoria de Kirchhoff e teoria de Mindlin-Reissner. Na teoria de Kirchhoff, supõe-se que as normais à superfície mediana antes da deformação permanecem retilíneas e normais à superfície mediana depois da deformação. A teoria de Mindlin-Reissner emprega a hipótese que as normais às superfícies medianas antes da deformação permanecem retilíneas mas não necessariamente normais à placa depois da deformação. A tensão normal à superfície mediana é negligenciada em ambas as teorias. Muitos tipos de elementos de placa e ocos foram estabelecidos com base nas teorias de placas e elementos ocos diferentes nos últimos 35 anos. Estes permitem a análise finita precisa de elementos de estruturas de paredes finas mas requerem um modelo que deve ser derivado da geometria sólida no sistema CAD. Um modelo de elemento oco para a análise consiste em uma retícula de elementos ocos planares ou curvos. Geralmente, a forma dos elementos é de uma forma geométrica simples, tais como triângulos ou quadriláteros. A espessura do elemento não é mostrada explicitamente no elemento, embora seja uma propriedade do elemento. Um modelo de elemento oco pode ser gerado a partir de uma geometria sólida mediante a formação de uma malha de elementos ocos na superfície imaginária que se encontra entre as paredes externas do modelo sólido. Essa superfície é freqüentemente

denominada a superfície do plano mediano do modelo sólido. Não é possível definir automaticamente a superfície do plano mediano em todos os casos, de modo que a geração de um modelo de elemento oco é freqüentemente uma tarefa laboriosa que envolve a construção de um modelo separado para a  
5 análise.

Desse modo, a abordagem do elemento sólido para a análise estrutural de um componente de paredes finas tem a vantagem de uma fácil interface para a geometria sólida, enquanto que a abordagem do elemento oco tem as vantagens de um bom desempenho estrutural, períodos curtos de  
10 computação, baixos requisitos de memória, e facilidade de geração de malha. Entretanto, a abordagem do elemento sólido tem as desvantagens de uma geração difícil de malha, um número elevado do elemento, longos períodos de cálculo, elevados requisitos de memória e fracos resultados se os elementos forem insuficientes através da espessura para elementos de baixa ordem,  
15 enquanto que com a abordagem do elemento oco fica difícil derivar um plano mediano para criar uma malha de elementos ocos.

Os métodos de elementos limítrofes existentes permitem a análise estrutural dos componentes mediante o emprego de uma malha gerada na superfície da geometria sólida, mas os métodos tradicionais do elemento  
20 limítrofe requerem que o material seja isotrópico e linear. Os métodos dos elementos limítrofes também levam a grandes sistemas de equações sem bandas, cuja solução requer grandes quantidades de memória.

Conforme descrito acima, o elemento oco é apropriado para a análise estrutural de estruturas (geralmente de paredes finas) se o modelo de  
25 plano mediano estiver disponível. As teorias de placa-elemento oco bem estabelecidas são utilizadas no elemento oco de modo que o número de dimensões seja reduzido sensivelmente de três para dois, isto é, de um sólido a uma superfície. Por outro lado, é desejável utilizar diretamente o modelo sólido

de um pacote de CAD para a análise finita de elementos.

Esses elementos ocos são geralmente de formato triangular ou quadrilátero, e podem ser planares ou curvos. Em cada nó há cinco ou seis graus de liberdade (dof). Os graus de liberdade, no caso mais geral, compreendem três translações e três rotações. A Figura 1 mostra um elemento oco triangular que tem um sistema de coordenadas local unido a ele; os graus de liberdade se referem a esse sistema de coordenadas. Os graus de liberdade de translação para o nó  $n$  ( $n = 1, 2$  ou  $3$ ) nas direções locais de  $x$ ,  $y$  e  $z$  são denotados, por  $u_{xn}$ ,  $u_{yn}$ , e  $u_{zn}$ , respectivamente. Analogamente, as rotações em torno dos eixos locais de  $x$ ,  $y$  e  $z$  são denotadas  $\theta_{xn}$ ,  $\theta_{yn}$ , e  $\theta_{zn}$ , respectivamente. A superfície através do elemento em que os nós são localizados é denominada superfície de referência. Um elemento oco é formulado geralmente com a superfície mediana como a superfície de referência. Se a superfície de referência do elemento não estiver na superfície mediana, o elemento é considerado como um elemento oco excêntrico, com a distância pela qual a superfície de referência é deslocada da superfície mediana denominada excentricidade,  $\varepsilon$  (vide a figura 2), onde também é indicada a superfície de referência 10, a superfície mediana 12 e os nós 14). A formulação para um elemento oco excêntrico pode ser estabelecida ao se estender a formulação do elemento oco normal. A relação entre os esforços na superfície mediana e na superfície de referência ou os graus de liberdade dos nós na superfície mediana e na superfície de referência pode ser utilizada para a extensão das formulações de elementos ocos normais para as formulações de elementos ocos excêntricos.

As Figuras 3A, 3B e 3C mostram três elementos ocos triangulares planares de espessura  $t$  com a superfície de referência colocada em três posições possíveis: a base, a superfície mediana e o topo do elemento, respectivamente. Nessas figuras,  $\bullet$  denota outra vez a posição do nó.

Um objetivo da presente invenção consiste em atacar as

limitações de uso de elementos sólidos e ocos para a análise estrutural de estruturas de paredes finas enquanto que são mantidas pelo menos algumas das vantagens de elementos ocos para estruturas de paredes finas.

- De acordo com a presente invenção, consequentemente, é
- 5   apresentado um método para analisar a resposta estrutural de um objeto que tem uma superfície exterior que compreende uma pluralidade de partes de superfície, o qual envolve:
- a formação de um modelo tridimensional do dito objeto, sendo que o dito modelo compreende uma malha de superfície representativa da dita superfície
  - 10   exterior e compreende uma pluralidade de elementos ocos excêntricos, onde cada um dos ditos elementos é definido por uma pluralidade de nós na dita superfície e cada uma dos ditos nós tem um ou mais graus de liberdade;
  - a atribuição, a cada um dos ditos elementos, de uma espessura indicativa da metade da espessura do dito objeto no dito elemento respectivo;
  - 15   - a definição, para cada um dos ditos elementos, de uma superfície de referência que inclui os nós dos ditos elementos respectivos e que é coincidente com a dita malha de superfície no dito elemento respectivo;
  - para um par de partes opostas da dita superfície, o estabelecimento de uma relação de restrição entre os ditos graus de liberdade de cada um dos ditos nós
  - 20   na primeira das ditas partes opostas e os ditos graus de liberdade de um ou mais dos nós na segunda das ditas partes opostas;
  - a execução de uma análise estrutural finita de elementos do dito objeto; e
  - a saída de um ou mais resultados da dita análise estrutural.

Desse modo, de acordo com a invenção, as superfícies de

25   referência dos elementos ocos são deslocadas e as restrições de múltiplos pontos (entre nós) são utilizadas e as espessuras atribuídas para assegurar que a coleção dos elementos nas partes de superfície correspondentes tenha as mesmas características estruturais que uma malha de elementos ocos localizada

no plano mediano do modelo sólido e tenha a espessura local do modelo sólido nessa posição. A execução da análise estrutural finita de elementos inclui a definição das condições limítrofes e a carga externa e/ou interna. Desse modo, a presente invenção utiliza os elementos ociosos modificados definidos na malha de superfície para executar a análise estrutural do componente sólido.

Os resultados da análise podem incluir os dados ou as imagens que indicam o estado de tensão e deformação esperado do objeto sob alguma carga interna ou externa.

As partes da superfície não podem ser planares.

Preferivelmente, para cada um dos ditos nós ditos da dita primeira parte das ditas partes opostas, o método inclui o estabelecimento de uma relação de restrição entre os ditos graus de liberdade do dito nó e os graus de liberdade de um nó oposto, sendo esse nó na segunda parte do dito par de partes opostas oposta ao dito nó, quando existe o dito nó oposto, ou entre os ditos graus de liberdade do dito nó e os ditos graus de liberdade dos ditos nós de um elemento oposto, sendo que esse elemento da dita parte oposta é oposto ao dito nó, quando não existe o nó oposto.

As partes da superfície podem ser classificadas como folhas ou bordas, e os elementos, de maneira correspondente, como elementos de folha ou elementos de borda.

A espessura indicativa da metade da espessura do dito objeto é preferivelmente derivada da espessura real do dito objeto se for possível definir essa espessura. Onde não é possível definir a espessura do dito objeto, a espessura dos ditos elementos pode ser tomada como sendo a espessura de elementos adjacentes, ou proporcional à espessura de elementos adjacentes.

Desse modo, mesmo onde possa ser impossível definir uma espessura significativa, tal como nas bordas do objeto ou em suas extremidades, uma espessura indicativa da espessura ainda pode ser definida.



Preferivelmente, o método inclui a seleção do dito par de partes opostas como sendo aquelas partes opostas da dita superfície do dito objeto entre as quais o dito objeto é o mais fino.

Desse modo, o método deve fornecer resultados excelentes para os objetos finos, em cujo caso a relação de restrição é definida preferivelmente entre os nós das partes de superfície entre as quais o dito objeto é geralmente o mais fino.

A malha pode compreender uma retícula de triângulos, quadriláteros ou outras formas simples (incluindo polígonos), qualquer das quais pode ser planar ou curva. Muitas destas formas podem ser geradas imediatamente por sistemas CAD.

A análise estrutural pode ser dos efeitos de tensões ou cargas internas induzidas no objeto durante a sua fabricação, em cujo caso a análise estrutural será da deformação ou empenamento resultante do objeto causado por essas cargas internas. Essa deformação é indicada abaixo como 'empenamento'.

O método pode criar a malha de superfície mediante a criação ou importação de uma representação de estereolitografia do objeto. Mais preferivelmente, o método pode então incluir o aperfeiçoamento da representação da estereolitografia (tal como mediante a geração de uma malha mais fina com elementos menores).

A presente invenção também apresenta um aparelho para analisar a estrutura de um objeto que tem uma superfície exterior que compreende uma pluralidade de partes de superfície, o qual contém:

um dispositivo de modelagem para formar um modelo tridimensional do dito objeto, sendo que o dito modelo compreende uma malha de superfície representativa da dita superfície exterior e compreende uma pluralidade de elementos ociosos excêntricos, sendo que cada um dos ditos elementos é definido

por uma pluralidade de nós na dita superfície e cada um dos ditos nós tem um ou mais graus de liberdade;

um dispositivo para atribuir a cada um dos ditos elementos uma espessura indicativa da metade da espessura do dito objeto no dito elemento respectivo;

- 5 um dispositivo para definir, para cada um dos ditos elementos, uma superfície de referência que inclua os nós do dito elemento respectivo e seja coincidente com a dita malha de superfície no dito elemento respectivo;

um dispositivo limitador para estabelecer, para um par de partes opostas da dita superfície, uma relação de restrição entre os ditos graus de liberdade de cada

- 10 um dos ditos nós na primeira parte das ditas partes opostas e os ditos graus de liberdade de um ou mais dos nós na segunda parte das ditas partes opostas;

um dispositivo de análise para executar uma análise estrutural finita de elementos do dito objeto; e

- 15 um dispositivo de saída para emitir um ou mais resultados da dita análise estrutural.

Cada um desses dispositivos pode incluir produtos ou partes de programas de computador, e o aparelho inclui preferivelmente um computador para executar essas partes do programa de computador.

- 20 Os resultados da análise podem incluir dados ou imagens (na forma de, por exemplo, impressos, exibições ou arquivos de computador) indicando o estado de deformação e tensão previsto do objeto sob alguma carga interna ou externa.

- O dito dispositivo limitador é preferivelmente operável, para cada um dos ditos nós da dita primeira parte das ditas partes opostas, para 25 estabelecer uma relação de restrição entre os ditos graus de liberdade do dito nó e os ditos graus de liberdade de um nó oposto, sendo que esse nó na segunda parte do dito par de partes opostas oposto é oposto ao dito nó, quando existe o dito nó oposto, ou entre os ditos graus de liberdade do dito nó e os ditos graus

de liberdade dos nós de um elemento oposto, sendo que esse elemento da dita parte oposta é oposto ao dito nó, quando não existe o dito nó oposto.

Preferivelmente, o dito dispositivo para atribuir a cada um dos ditos elementos uma espessura (isto é, indicativo da metade da espessura do objeto no elemento respectivo) é operável para empregar uma espessura indicativa da espessura total do dito objeto no dito elemento respectivo na dita espessura total real do dito objeto se for possível definir essa espessura, e, onde não for possível definir a espessura do dito objeto, atribuir aos ditos elementos uma espessura igual à espessura de elementos adjacentes, ou proporcional à espessura de elementos adjacentes.

Desse modo, no cálculo da espessura indicativa da metade da espessura do objeto, o aparelho preferivelmente deriva a meia espessura de uma espessura total real, se for possível.

O aparelho é configurado preferivelmente para selecionar como o dito par de partes opostas as partes opostas da dita superfície do dito objeto entre as quais o dito objeto é o mais fino.

A malha pode compreender uma retícula de triângulos, quadriláteros ou outras formas simples planares ou curvas. Muitas destas formas podem ser geradas imediatamente por sistemas CAD.

O dispositivo de análise pode ser operável ou configurado para analisar os efeitos de tensões ou cargas internas induzidas no objeto durante a sua fabricação, em cujo caso a análise estrutural será da deformação ou empenamento resultante do objeto causado por essas cargas internas.

#### Breve Descrição dos Desenhos

Uma realização preferida será descrita agora, por exemplo, a título de exemplo, com referência aos desenhos anexos, nos quais:

A Figura 1 é uma ilustração de um elemento oco triangular exemplificador da técnica anterior com um sistema de coordenadas local

definido;

A Figura 2 ilustra um elemento oco excêntrico da técnica anterior, no qual a superfície de referência do elemento não está na superfície mediana;

5 As Figuras 3A, 3B e 3C mostram, cada uma delas, um elemento oco triangular planar da técnica anterior de espessura  $t$  com a superfície de referência colocada em uma dentre três posições possíveis;

A Figura 4 é uma vista de uma barra retangular fina como um exemplo de um objeto a ser modelado;

10 A Figura 5 é uma vista da barra da figura 4 modelada com elementos ocios convencionais da técnica anterior;

A Figura 6 é uma vista da barra da figura 4 modelada com elementos ocios em um método de acordo com uma realização preferida da presente invenção;

15 A Figura 7 é uma vista de um modelo sólido de um objeto do tipo placa simples de espessura  $h$ , mostrando como ele pode ser visto de acordo com a presente invenção como a ligação de duas placas cada uma com a espessura de  $0,5h$ ;

20 A Figura 8 é uma vista de um modelo de uma peça em forma de T que compreende representações entrelaçadas de primeira e segunda superfícies geralmente opostas da peça;

A Figura 9 é uma vista da combinação de um nó de um elemento de uma superfície de um objeto com um elemento da superfície oposta do objeto de acordo com a presente invenção;

25 A Figura 10 é uma vista do sistema de coordenadas local do elemento combinado; e

A Figura 11 é uma vista dos elementos da borda do modelo de um objeto de acordo com a presente invenção.

### Descrição Detalhada da Invenção

Um método para utilizar uma malha de elementos ocos definidos no limite de um objeto tridimensional para executar a análise estrutural no corpo tridimensional, de acordo com uma realização preferida da presente invenção, é descrito abaixo.

A fim de introduzir uma série de conceitos, uma barra retangular fina de espessura  $t$  é ilustrada, por exemplo, na figura 4. A resposta estrutural da barra é representada por meio de um modelo oco que é definido como a malha no exterior do corpo. Na figura 4, a malha que define a barra retangular é definida como sendo o conjunto de elementos ocos quadriláteros definidos pela colocação de nós nos vértices indicados tal como segue:

Elemento N°	Definição por Vértices
1	adgh (o topo da barra)
2	bcfe (a base da barra)
3	abeh (a borda da esquerda da barra)
4	dcfg (a borda da direita da barra)
5	abcd (a borda anterior da barra)
6	efgh (a borda posterior da barra)

Para fins de maior clareza, as bordas (os elementos 3, 4, 5 e 6) são ignorados para o presente, mas discutidas mais adiante; como os elementos ocos enumerados 1 e 2 (representando o topo e a base da barra) podem ser utilizados para definir a resposta estrutural da barra será descrito primeiramente.

Como um aparte, pode-se observar que, se os elementos ocos convencionais de espessura  $t$  forem utilizados para os elementos 1 e 2, com as superfícies de referência definidas pelos nós adgh e bcfe, respectivamente, e os elementos forem considerados como ligados uns aos outros para formar um modelo oco em camadas, o modelo resultante deve

fornecer a resposta de um modelo mais rígido, uma vez que o domínio do modelo oco deve se estender para fora da barra (vide a figura 5, na qual a referência numérica 16 indica a superfície de referência para o elemento 1 e a referência numérica 18 indica a superfície de referência para o elemento 2). De fato, para a barra de espessura  $t$ , esse modelo de elemento oco representaria uma barra de espessura  $2t$ . A fim de obter a resposta estrutural correta, de acordo com a presente invenção, uma espessura de  $0,5 t$  é atribuída aos elementos 1 e 2, e a superfície de referência 20 para o elemento 1 é movida para o alto da barra (definida pelos nós em  $adgh$ ) e a superfície de referência 22 para o elemento 2 para a base da barra (definida pelos nós em  $bcfe$ ) tal como mostrado na figura 6.

Na discussão acima, o efeito das bordas foi ignorado: isto vai ser discutido a seguir. Os elementos são considerados como ligados uns aos outros. Isto é realizado realmente de acordo com a invenção ao se utilizar restrições de múltiplos pontos e será discutido mais abaixo em detalhes.

Além disso, o caso simples do modelo sólido de uma placa plana é mostrado na figura 7. Ele aparece como uma cobertura dupla, contendo uma superfície superior e uma superfície inferior. Do ponto de vista geométrico, a placa plana pode ser vista como a ligação de duas placas, cada uma das quais de meia espessura. A placa superior é modelada ao se utilizar o elemento oco excêntrico com a superfície superior como a superfície de referência, onde as suposições da placa são empregadas. Analogamente, a placa inferior é modelada ao se utilizar o elemento excêntrico oco com a superfície inferior como a superfície de referência. A ligação das placas superior e inferior pode ser considerada como derivando da relação física entre a deformação da superfície superior e aquela da superfície inferior. Essa relação é estabelecida ao se empregar as suposições de teorias clássicas de placas.

O método preferido de análise estrutural de acordo com a

invenção inclui as seguintes etapas, cada uma das quais será discutida em detalhes:

- 1 Criação da malha no limite exterior;
  2. Atribuição da espessura e da excentricidade: Elementos combinados e não  
5 combinados;
  3. Combinação dos nós às superfícies;
  4. Estabelecimento de equações de restrição entre graus de liberdade de um nó  
n e graus de liberdade de seu elemento combinado e;
  5. Especificação de condições de cargas interna e externa e limítrofes; e
  - 10 6. Execução da análise e aperfeiçoamento do projeto.
- Criação da malha no limite exterior

Começar a partir de um modelo sólido, utilizar as superfícies exteriores que definem o objeto tridimensional para criar um domínio computacional ao invés de uma superfície de plano mediano. Entrelaçar a  
15 superfície exterior utilizando elemento triangular ou quadrilátero. O domínio computacional deve compreender representações entrelaçadas de primeira e segunda superfícies geralmente opostas de uma peça. Por exemplo, a malha ou domínio computacional de uma peça em forma de T é mostrado na figura 8.

- Atribuição da espessura e excentricidade: Elementos combinados e não  
20 combinados

Considerar a primeira superfície como a superfície de referência da primeira peça de meia espessura e a segunda superfície como a superfície de referência da segunda peça de meia espessura. Os elementos das duas superfícies são combinados, com base na capacidade de identificar uma  
25 espessura entre tais elementos. Atribuir a espessura desses elementos ocas para que seja a metade da distância entre os elementos combinados. As excentricidades dos elementos na primeira e segunda superfícies também são determinadas, as quais são a metade da espessura do elemento. O sinal

(positivo ou negativo) das excentricidades dos elementos depende da regra predefinida das formulações escolhidas do elemento oco.

Preferivelmente, a quaisquer elementos não combinados das ditas primeira e segunda superfícies, que são elementos que não podem ser combinados, é atribuída a espessura que é a média da espessura dos elementos combinados adjacentes onde existe esse elemento combinado adjacente, ou dos elementos não combinados adjacentes onde não existem esses elementos combinados adjacentes e aos ditos elementos não combinados adjacentes foi atribuída a espessura. Atribuir então a excentricidade desses elementos tal como no caso dos elementos combinados. Desse modo, eventualmente a todos os elementos combinados e não combinados da primeira e segunda superfícies podem ser atribuídas espessuras e excentricidades.

Cada elemento de uma superfície da borda, que é uma superfície entre as ditas primeira e segunda superfícies, e adjacente a qualquer uma entre as ditas primeira ou a segunda superfícies, é atribuída uma espessura entre 0,01 e 100,0 vezes (e preferivelmente 1/3) da espessura do elemento da primeira e segunda superfícies às quais o elemento da superfície da borda é adjacente.

Preferivelmente, a cada elemento de uma superfície da borda não adjacente à dita primeira ou segunda superfície é atribuída uma espessura que é a média das espessuras dos elementos adjacentes da dita superfície da borda aos quais foram atribuídas espessuras.

Para simular as características de deformação da borda de peças de paredes finas, a cada elemento de uma superfície da borda são atribuídas as propriedades de materiais ortotrópicos artificiais. A orientação do eixo do material principal é ao longo da direção da espessura da peça. O módulo de Young paralelo à direção da espessura da peça ( $E_1$ ) pode ser atribuído entre 0,001 e 1000 (e preferivelmente 15) vezes o módulo de Young



médio do material das ditas primeira e segunda superfícies às quais o dito elemento da dita superfície da borda é adjacente. O módulo de Young perpendicular à direção da espessura da peça (E2) pode ser atribuído entre 0,001 e 100 (e preferivelmente 0,1) vezes o módulo de Young médio do material das ditas primeira e segunda superfície às quais o dito elemento da dita superfície da borda é adjacente.

Preferivelmente, a cada elemento de uma superfície da borda não adjacente à dita primeira ou segunda superfície é atribuído o módulo de Young paralelo e perpendicular à direção da espessura da peça (E1) que é a média do módulo de Young paralela à direção da espessura da peça e a média do módulo de Young perpendicular à direção da espessura da peça dos elementos adjacentes da dita superfície da borda aos quais foram atribuídas propriedades dos materiais, respectivamente.

A excentricidade para cada elemento da superfície da borda é igual a zero.

- Combinação de nós aos pontos na superfície

Com referência à Figura 9, estabelecer a relação de combinação entre o nó n na dita primeira superfície (conforme ilustrado, a superfície inferior 24) e o ponto P na segunda superfície geralmente oposta (conforme ilustrado, a superfície superior 26), com base na regra que a linha de conexão do nó n e do ponto P é paralela à normal da dita primeira superfície 24 no nó n ou à normal da dita segunda superfície 26 no ponto P ou algum tipo do vetor médio dessas duas normais. O ponto P é geralmente dentro de um elemento particular, mas poderia ser um nó sobre ou ao lado de um elemento na dita segunda superfície. O ponto P é considerado como o ponto de combinação desse nó n. O elemento no qual o ponto P fica localizado também é determinado com facilidade e considerado como o elemento de combinação do nó. Se o ponto P for compartilhado por diversos elementos, um desses diversos

elementos é escolhido como o elemento de combinação. Nesta realização, o elemento da área menor é escolhido como o elemento de combinação.

- Estabelecimento de equações de restrição entre graus de liberdade de um nó  $n$  e graus de liberdade de seu elemento de combinação  $e$

5                    Em ambas as teorias de placas de Kirchhoff e Mindlin-Reissner, a suposição de que as normais à superfície mediana antes da deformação permanecem retilíneas é aplicável. Conforme descrito acima, os elementos da dita primeira superfície representam a primeira peça de meia espessura, e os elementos da dita segunda superfície representam a segunda  
10    peça de meia espessura. Para unir a primeira peça de meia espessura e a segunda peça de meia espessura uma à outra de modo que elas possam suportar a carga como uma unidade, a suposição acima deve ser aplicada entre a deformação da dita primeira malha da superfície e da dita segunda malha da superfície. Numericamente, os graus de liberdade dos nós na dita primeira  
15    superfície devem ser relacionados com os graus de liberdade dos nós na dita segunda superfície.

                    Com referência à Figura 10, uma vez que um nó  $n$  tem o seu ponto de combinação  $P$  na superfície oposta (o elemento  $e$ ), a sua linha da conexão é exatamente ou muito proximamente paralela à normal da superfície  
20    mediana. Com base na suposição de que as normais à superfície mediana antes que a deformação permanecem retilíneas, todos os ou alguns graus de liberdade (deslocamentos translacionais e rotações) do nó  $n$  podem ser expressados como funções lineares das variáveis do deslocamento (deslocamentos translacionais e rotações) no ponto de combinação  $P$  no sistema  
25    de coordenadas local do elemento de combinação.

                    Com base na posição do ponto de combinação no elemento combinado e na função de interpolação de deslocamento do elemento oco escolhido, as variáveis do deslocamento (deslocamentos transicionais e

rotações) no ponto de combinação podem ser expressadas como funções lineares dos graus de liberdade dos nós do elemento de combinação no sistema de coordenadas local do elemento de combinação (figura 10).

Consequentemente, de acordo com as duas relações acima,  
 5 todos ou uma parte dos graus de liberdade do nó podem ser expressados como funções lineares dos graus de liberdade dos nós do elemento de combinação. Essas relações são as equações típicas de restrição de múltiplos pontos (MPC) que podem ser incorporadas nas equações de matriz de elemento finito globais. Os algoritmos para tratar das equações de MPC estão bem estabelecidos e  
 10 disponíveis em vários textos publicados na análise finita de elementos. O método de transformação, o multiplicador de Lagrange e os métodos da função de penalidade de implementação de restrição de múltiplos pontos são todos aplicáveis ao presente problema.

Um elemento oco de facetas triangulares é utilizado nesta  
 15 realização. Este é um elemento de três nós com dezoito graus de liberdade (seis em cada nó). O elemento é construído mediante a sobreposição da formulação de membrana local de Bergan e Felippa (Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, em 50 (1985) 25) com a formulação de flexão de Batoz e Lardeur (International Journal of Numerical Methods in Engineering, 28  
 20 (1989) 533) e transformação das equações combinadas no sistema de coordenadas global.

O grau de liberdade de rotação de perfuração em torno da normal da superfície de referência local é utilizado na formulação da membrana, que é definido no sistema de elemento local por:

$$25 \quad \theta_x = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial \mu_y}{\partial x} - \frac{\partial \mu_x}{\partial y} \right] \quad (1)$$

Em seguida, é definida a relação entre os graus de liberdade do nó  $n$  e daqueles de seu elemento de combinação e (vide a figura 10). Com base na suposição de que as normais à superfície mediana antes da deformação

permanecem retílineas depois da deformação que são utilizadas em ambas as teorias de placas de Kirchhoff e de Mindlin, há as seguintes relações entre os graus de liberdade do nó n e os deslocamentos e rotações de seu ponto de combinação p.

$$5 \quad u_{xn} = u_{xp} - \theta_{yp}h$$

$$u_{yn} = u_{yp} + \theta_{xp}h$$

$$u_{zn} = u_{zp}$$

$$\theta_{xn} = \theta_{xp} \quad \dots(2)$$

$$\theta_{yn} = \theta_{yp}$$

$$10 \quad \theta_{zn} = \theta_{zp} + h/2 \left[ \partial\theta_{xp}/\partial x + \partial\theta_{yp}/\partial y \right]$$

onde 'h' é a distância entre o nó n e seu ponto de combinação p; e  $u_{xn}$ ,  $u_{yn}$ ,  $u_{zn}$ ,  $\theta_{xn}$ ,  $\theta_{yn}$  e  $\theta_{zn}$  são os graus locais de liberdade no nó n relacionado com o sistema de coordenadas do elemento local de seu elemento de combinação e;  $u_{xp}$ ,  $u_{yp}$ ,  $u_{zp}$ ,  $\theta_{xp}$ ,  $\theta_{yp}$ , e  $\theta_{zp}$  são os deslocamentos e rotações no ponto p e também estão no sistema de coordenadas do elemento local do elemento de combinação e.

Deve-se observar que a última relação na equação (2) que define  $\theta_{zn}$  é obtida ao se utilizar a equação (1).

A equação (2) pode ser reformulada na forma de matriz:

$$20 \quad \underline{U}_n = \underline{A}_1 \underline{U}_p + \underline{A}_2 \underline{D}_\theta \quad \dots(3)$$

$$\text{onde } \underline{U}_n = (u_{xn}, u_{yn}, u_{zn}, \theta_{xn}, \theta_{yn}, \theta_{zn})^T, \underline{U}_p = (u_{xp}, u_{yp}, u_{zp}, \theta_{xp}, \theta_{yp}, \theta_{zp})^T,$$

$$\underline{D}_\theta = [\partial\theta_{xp}/\partial x, \partial\theta_{yp}/\partial y]^T$$

e  $\underline{A}_1$  e  $\underline{A}_2$  são matrizes que dependem da distância entre o nó n e o ponto p.

A partir da formulação do elemento, os deslocamentos e rotações no ponto p podem ser obtidos através de interpolações de função de forma. Ou seja,

$$25 \quad \underline{U}_p = \underline{B}_e \underline{\alpha}_e \quad \dots(4)$$

onde:

$\underline{\alpha}_e = (u_{xi}, u_{yi}, u_j, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{rj}, u_{xj}, u_{yj}, u_{rj}, \theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{rj}, u_{xk}, u_{yk}, u_{zk}, \theta_{xk}, \theta_{yk}, \theta_{zk}, e$

$\underline{B}_1$  é uma matriz cujos valores dependem das coordenadas locais do ponto p.

Com base na equação (4),  $\underline{D}_\theta$  pode ser expressado como:

$$\underline{D}_\theta = \underline{B}_2 \underline{\alpha}_e \quad \dots(5)$$

5 onde  $\underline{B}_2$  é uma matriz cujos valores também dependem das coordenadas locais do ponto p.

Combinando as equações (3), (4) e (5), a relação entre os graus de liberdade do nó n e os graus de liberdade de seu elemento de combinação a é obtida:

$$10 \quad \underline{U}_n = (\underline{A}_1 \underline{B}_1 + \underline{A}_2 \underline{B}_2) \underline{\alpha}_e \quad \dots(6)$$

Essas equações de restrição podem ser transformadas no sistema de coordenadas global, para se obter desse modo as equações finais de restrição entre os graus de liberdade do nó n e os graus de liberdade de seu elemento de combinação e no sistema de coordenadas global.

15 • Especificação de condições de carga externa e interna e limitrofes

As condições de carga e restrição e a propriedade do material para a malha são especificadas então. A condição de carga inclui quaisquer tipos de cargas externas e/ou internas usuais. As cargas ativas podem ser definidas em pontos, bordas, remendos ou volumes. O tipo de carga pode ser de forças  
20 reais estáticas ou dinâmicas ou carga térmica, tensão/esforço residual e tensão/esforço inicial. O material podia ser isotrópico ou anisotrópico.

• Executar a análise e aperfeiçoar o projeto

Uma análise finita do elemento da estrutura do objeto é executada então para se obter o deslocamento, o esforço e a tensão.

25 Os resultados da análise deverão incluir tensões, esforços, deflexões e a forma deformada do componente. A invenção pode consequentemente ser utilizada para determinar quaisquer dos resultados usuais da análise estrutural, incluindo, por exemplo:

1. o material é sujeito a um nível demasiadamente elevado de tensão ou esforço;
2. o componente é suficientemente rígido para desempenhar a sua função de projeto pretendida; e
3. a peça defletida causa impacto em outras peças em um conjunto.

5                   Ao se levar em consideração os resultados da análise, o usuário pode modificar o tipo da geometria ou do material de peça para melhorar o desempenho da peça sob condições de carga.

                 Este método preferido pode ser utilizado para a análise do empenamento das peças moldadas a injeção. Primeiramente, uma distribuição  
10 de tensão residual no molde, como um exemplo de uma carga interna, é determinada por um software de análise do fluxo e refrigeração, tal como aquele fornecido pela Moldflow Corporation. A expressão "distribuição da tensão residual no molde" se refere à distribuição da tensão na peça devido ao processamento enquanto a peça se encontra no molde e imediatamente antes  
15 da ejeção. Essa distribuição pode ser utilizada como a entrada no aparelho descrito aqui para produzir a forma defletida do componente e da distribuição da tensão residual resultante. Um usuário do método preferido da presente invenção pode então modificar a geometria da peça, as condições do processo ou o tipo de material, e executar uma análise adicional para se certificar que o  
20 projeto foi aperfeiçoado.

                 Alternativamente, o tensão residual, o esforço residual ou as cargas térmicas podem ser obtidos por um outro software comercial de maneira tal que, quando utilizado em uma análise estrutural, a forma deformada pode ser calculada desse modo no tocante aos efeitos de processamento, à geometria da  
25 peça e ao tipo do material.

                 Para a análise do empenamento das peças moldadas a injeção, uma mudança da espessura deve ser forçada ao se modificar a equação de restrição especial (2) entre a deflexão local ( $u_{xn}$ ) de um nó da primeira

superfície e a deflexão local ( $u_{zp}$ ) do ponto de combinação da superfície oposta, de modo que:

$$u_{zn} = u_{zp} + \varphi h$$

onde  $\varphi$  representa a contração da espessura, cujo valor é baseado no nível de  
5 tensão residual no molde na peça. Deve-se observar que esse nível de tensão residual é a tensão residual no plano.

Nessa realização preferida, as tensões iniciais principais são calculadas a partir das tensões residuais no plano no molde para todos os elementos exceto os elementos na superfície da borda, e então  $\varphi$  é obtido  
10 simplesmente ao se calcular a média dessas tensões iniciais principais. A contração da espessura  $\varphi$  é consequentemente a tensão média no plano resultante da distribuição da tensão no plano imediatamente antes da ejeção da peça.

Os resultados da tensão residual no molde nos elementos de  
15 uma superfície da borda a partir da análise de fluxo e refrigeração são descartados. As tensões residuais em molde artificiais especiais são atribuídos nesses elementos da borda para evitar o empenamento não realista devido às restrições dos elementos da borda da deformação da peça.

Para os elementos da borda tais como  $e_1$  na figura 11, que  
20 compartilha de um lado ab com o elemento  $e_2$  em uma dentre a primeira ou a segunda superfícies, as suas tensões iniciais são calculadas tal como abaixo: primeiramente, o esforço ao longo do lado ab é calculado com base nas tensões residuais no molde do elemento  $e_2$ , e em segundo lugar esse esforço é passado para o elemento  $e_1$  como seu esforço principal perpendicular à direção da  
25 espessura da peça, e em terceiro lugar o esforço da contração da espessura  $\varphi$  é passado ao elemento  $e_1$  como o seu esforço principal paralelo à direção da espessura da peça. Finalmente, a partir desses dois esforços principais, as tensões residuais no molde equivalentes podem ser derivadas para o elemento

da borda  $e_1$ .

Para os elementos da borda tais como  $e_3$  na figura 11, que não compartilham nenhum lado com nenhum elemento na primeira ou segunda superfícies, as suas tensões residuais no molde são atribuídas para que sejam  
5 as tensões residuais médias no molde dos elementos de borda adjacentes da dita superfície da borda aos quais foram atribuídas tensões residuais artificiais no molde.

Daí conclui-se que o conceito essencial da presente invenção é desse modo o uso de uma malha de superfície em um modelo sólido para  
10 executar a análise estrutural. A invenção é idealmente adequada para estruturas de paredes finas. Ela também é particularmente útil se houver algumas pequenas regiões disformes na estrutura de parede fina e o estado de tensão/esforço não for importante nessas regiões disformes. A análise pode ser utilizada para a análise estrutural estática e dinâmica incluindo a análise de  
15 frequência linear, não linear, ondulada e modal. Muitos tipos diferentes de carga podem ser utilizados. Os resultados da análise compreendem: tensões, esforços, deformação da peça e deflexões no sistema de coordenadas global.

A presente invenção também pode ser utilizada para a análise do empenamento de peças moldadas a injeção. Quando utilizados para a  
20 análise de empenamento, os resultados são tal como quanto para o caso da análise estrutural (tensões, esforços, deformação da peça e deflexões no sistema de coordenadas global) mas a forma deformada é devida às tensões residuais desenvolvidas durante o processo de moldagem a injeção.

Não há nenhuma limitação especial para o tipo de carga e de  
25 material tal como no caso do método do elemento limítrofe. Um modelo sólido pode ser inserido em diversos formatos de arquivos, tais como STL, IGES, ACIS, PARASOLID, e assim por diante. Certamente que é somente necessário que uma malha de superfície seja produzida no modelo da peça para permitir o uso



do método.

Em vista do acima exposto, o método e o aparelho da invenção são particularmente apropriados para a análise dos componentes moldados a injeção nos quais as propriedades dos materiais são afetadas pelo processamento. A este respeito, o método descrito no presente pedido de patente pode ser utilizado para executar a análise estrutural (linear ou não linear) em um componente moldado a injeção nas quais as propriedades dos materiais são ortotrópicas. Essa análise pode formar uma interface com outras formas de análise, tal como fornecido pela Moldflow Corporation, que podem prever as propriedades mecânicas do material moldado a injeção. A variação nas propriedades mecânicas pode resultar da orientação molecular, da morfologia cristalina ou da adição do reforço de fibras curtas.

O método descrito na presente invenção também pode ser utilizado para determinar a forma empenada dos componentes moldados a injeção produzidos a partir de materiais poliméricos, carregados com metal, carregados com cerâmica ou de metal. Devido aos efeitos do processamento, os materiais moldados a injeção podem encolher em proporções diferentes em diferentes direções. A presente invenção pode formar uma interface com outros produtos de análise que podem prever a distribuição da tensão residual nas peças moldadas a injeção. Essa distribuição da tensão residual é determinada ao se levar em consideração a variação nas propriedades termomecânicas do material devido ao processamento. Ao se utilizar essa distribuição da tensão como a carga para uma análise estrutural, a forma empenada e a contração final do componente podem ser determinadas. Se tal análise indicar níveis excessivos de empenamento, a geometria dos componentes, o tipo material ou as condições de processamento podem ser alterados. Uma outra análise pode ser executada, e assim por diante, até que uma melhoria seja observada.

Modificações dentro do caráter e do âmbito da invenção

podem ser efetuadas imediatamente por um elemento versado na técnica. Deve ficar compreendido, portanto, que a presente invenção não fica limitada às realizações particulares descritas a título de exemplo acima.

## Reivindicações

### 1. "MÉTODO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO"

que tem uma superfície exterior que compreende uma pluralidade de partes de superfície, caracterizado pelo fato de envolver: a formação de um modelo tridimensional do dito objeto, sendo que o dito modelo compreende uma malha de superfície representativa da dita superfície exterior e compreende uma pluralidade de elementos ocossos excêntricos, onde cada um dos ditos elementos é definido por uma pluralidade de nós na dita superfície e cada uma dos ditos nós tem um ou mais graus de liberdade; a atribuição, a cada um dos ditos elementos, de uma espessura indicativa da metade da espessura do dito objeto no dito elemento respectivo; a definição, para cada um dos ditos elementos, de uma superfície de referência que inclui os nós dos ditos elementos respectivos e que é coincidente com a dita malha de superfície no dito elemento respectivo; para um par de partes opostas da dita superfície, o estabelecimento de uma relação de restrição entre os ditos graus de liberdade de cada um dos ditos nós na primeira das ditas partes opostas e os ditos graus de liberdade de um ou mais dos nós na segunda das ditas partes opostas; a execução de uma análise estrutural finita de elementos do dito objeto; e a saída de um ou mais resultados da dita análise estrutural.

### 2. "MÉTODO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO",

de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que algumas ou todas as ditas partes de superfície não são planares.

### 3. "MÉTODO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO",

de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que, para cada um dos ditos nós das ditas primeiras partes opostas, o método inclui o estabelecimento de uma relação de restrição entre os ditos graus de liberdade do dito nó e os ditos graus de liberdade de um nó oposto, sendo que esse nó no dito segundo par de partes opostas é oposto ao dito nó, quando existe o dito nó oposto, ou entre os ditos graus de liberdade do dito nó e os ditos graus de liberdade dos ditos nós de um elemento oposto, sendo esse elemento da dita parte oposta é oposto ao dito nó, quando não existe o dito nó oposto.

4. "MÉTODO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de que a dita espessura indicativa da metade da espessura do dito objeto é derivada da espessura real do dito objeto se for possível definir tal espessura e, onde não for possível definir a espessura real do dito objeto, a espessura dos ditos elementos é tomada como a espessura dos elementos adjacentes, ou proporcional à espessura dos elementos adjacentes.

5. "MÉTODO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de incluir a seleção do dito par de partes opostas para que sejam as partes opostas da dita superfície do dito objeto entre as quais o dito objeto é o mais fino.

6. "MÉTODO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de que a dita malha compreende uma retícula de triângulos, quadriláteros ou outras formas simples, tanto planar quanto curva.

7. "MÉTODO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de se prestar à análise dos efeitos das tensões ou das cargas internas induzidas no dito objeto durante a sua fabricação.

8. "MÉTODO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", de acordo com a reivindicação 7, caracterizado pelo fato de se prestar à análise da deformação ou do empenamento do dito objeto causado pelas ditas cargas ou tensões internas.

9. "MÉTODO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de que o dito método inclui a criação da dita malha de superfície mediante a criação ou a importação de uma representação de estereolitografia do dito objeto.

10. "MÉTODO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de incluir a criação da dita malha de superfície mediante: a criação ou a

importação de uma representação de estereolitografia do dito objeto; e o aperfeiçoamento da dita representação de estereolitografia.

11. "MÉTODO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de que o dito método é executado por um computador que roda um programa de computador que codifica o dito método para analisar a resposta estrutural de um objeto.

12. "MÉTODO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato de compreender, ainda, fabricação do objeto.

13. "APARELHO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", que tem uma superfície exterior que compreende uma pluralidade de partes de superfície, caracterizado pelo fato de conter: um dispositivo de modelagem para formar um modelo tridimensional do dito objeto, sendo que o dito modelo compreende uma malha de superfície representativa da dita superfície exterior e compreende uma pluralidade de elementos ocos excêntricos, sendo que cada um dos ditos elementos é definido por uma pluralidade de nós na dita superfície e cada um dos ditos nós tem um ou mais graus de liberdade; um dispositivo para atribuir a cada um dos ditos elementos uma espessura indicativa da metade da espessura do dito objeto no dito elemento respectivo; um dispositivo para definir, para cada um dos ditos elementos, uma superfície de referência que inclua os nós do dito elemento respectivo e seja coincidente com a dita malha de superfície no dito elemento respectivo; um dispositivo limitador para estabelecer, para um par de partes opostas da dita superfície, uma relação de restrição entre os ditos graus de liberdade de cada um dos ditos nós na primeira parte das ditas partes opostas e os ditos graus de liberdade de um ou mais dos nós na segunda parte das ditas partes opostas; um dispositivo de análise para executar uma análise estrutural finita de elementos do dito objeto; e um dispositivo de saída para emitir um ou mais resultados da dita análise estrutural.

14. "APARELHO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que os

ditos resultados da dita análise incluem os dados ou as imagens que indicam o estado de deformação ou tensão previsto sob alguma carga interna ou externa.

15. "APARELHO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", de acordo com qualquer uma das reivindicações 13 a 14, caracterizado pelo fato de que o dito dispositivo limitador é operável, para cada um dos ditos nós da dita primeira parte das ditas partes opostas, para estabelecer uma relação de restrição entre os ditos graus de liberdade do dito nó e os graus de liberdade de um nó oposto, sendo que esse nó na segunda parte do dito par de partes opostas é oposto ao dito nó, quando existe o dito nó oposto, ou entre os ditos graus de liberdade do dito nó e os ditos graus de liberdade dos ditos nós de um elemento oposto, sendo esse elemento da dita parte oposta é oposto ao dito nó, quando não existe o nó oposto.

16. "APARELHO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", de acordo com qualquer uma das reivindicações 13 a 15, caracterizado pelo fato de que o dito dispositivo para atribuir a cada um dos ditos elementos uma espessura é operável para empregar uma espessura indicativa da espessura total do dito objeto no dito elemento respectivo na dita espessura total real do dito objeto se for possível definir essa espessura, e, onde não for possível definir a espessura do dito objeto, atribuir aos ditos elementos uma espessura igual à espessura de elementos adjacentes, ou proporcional à espessura de elementos adjacentes.

17. "APARELHO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", de acordo com qualquer uma das reivindicações 13 a 16, caracterizado pelo fato de que o aparelho é configurado para selecionar como o dito par de partes opostas as partes opostas da dita superfície do dito objeto entre as quais o dito objeto é o mais fino.

18. "APARELHO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", de acordo com qualquer uma das reivindicações 13 a 17, caracterizado pelo fato de que a dita malha compreende uma retícula de triângulos, quadriláteros ou outras formas simples, tanto planar quanto curva.

19. "APARELHO PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", de acordo com qualquer uma das reivindicações 13 a 18, caracterizado pelo fato de que o dito dispositivo de análise é operável ou configurado para analisar os efeitos das tensões ou cargas internas induzidas no objeto durante a sua fabricação.

20. "MÍDIA PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", caracterizada pelo fato de compreender uma implementação por programa de computador do método para analisar a resposta estrutural de um objeto de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 11.

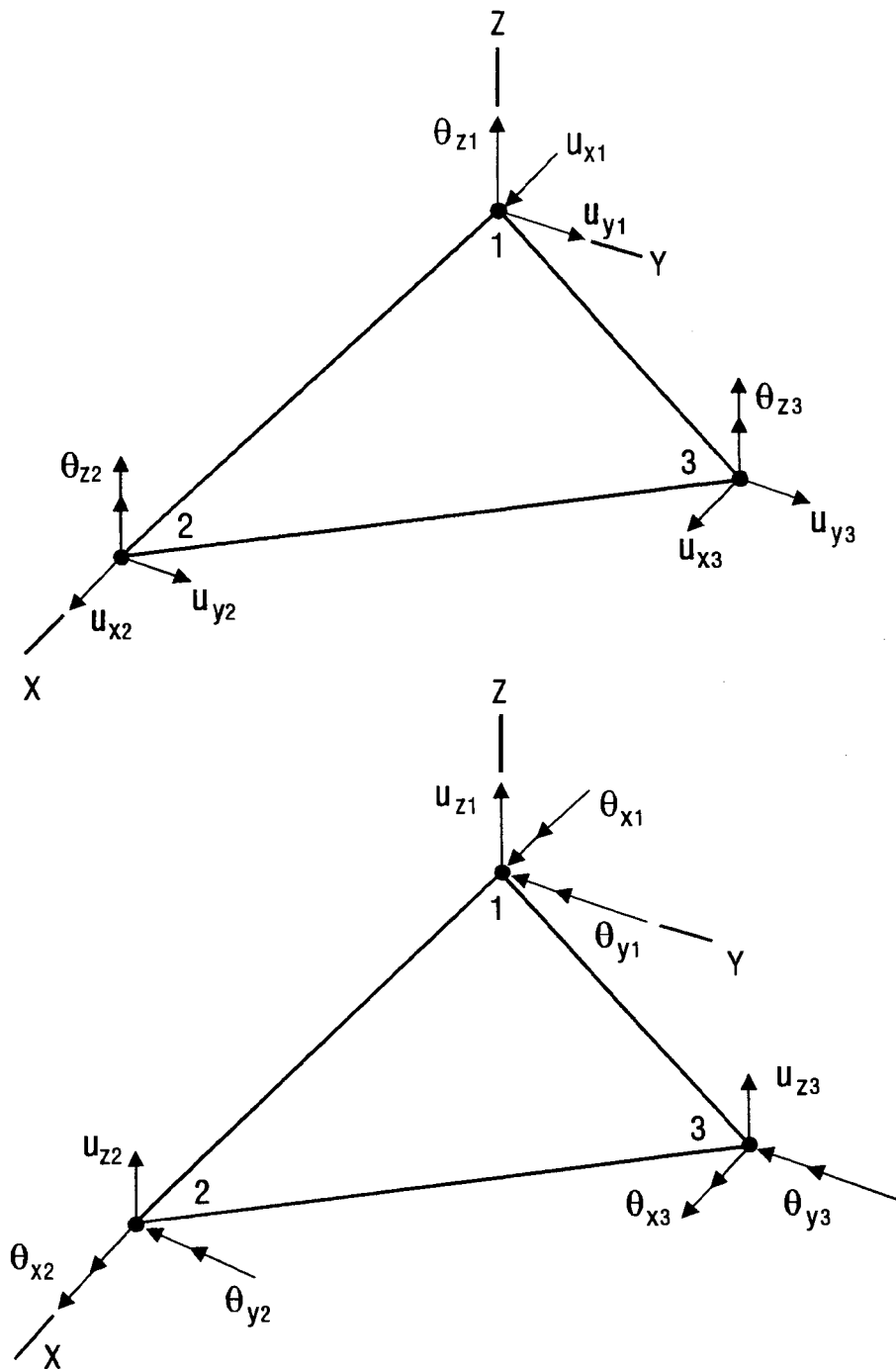


FIG. 1



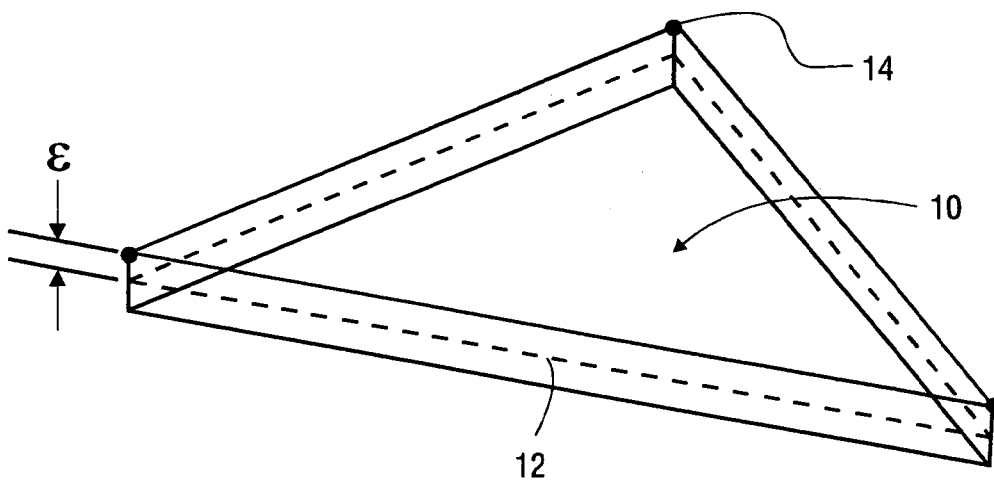


FIG. 2

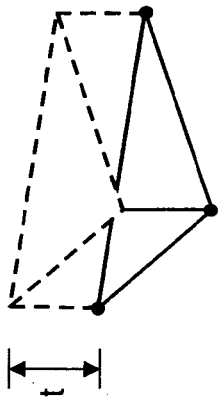


FIG. 3A

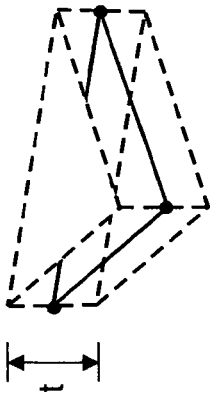


FIG. 3B

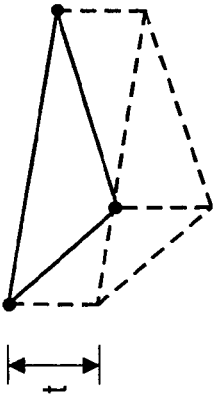


FIG. 3C

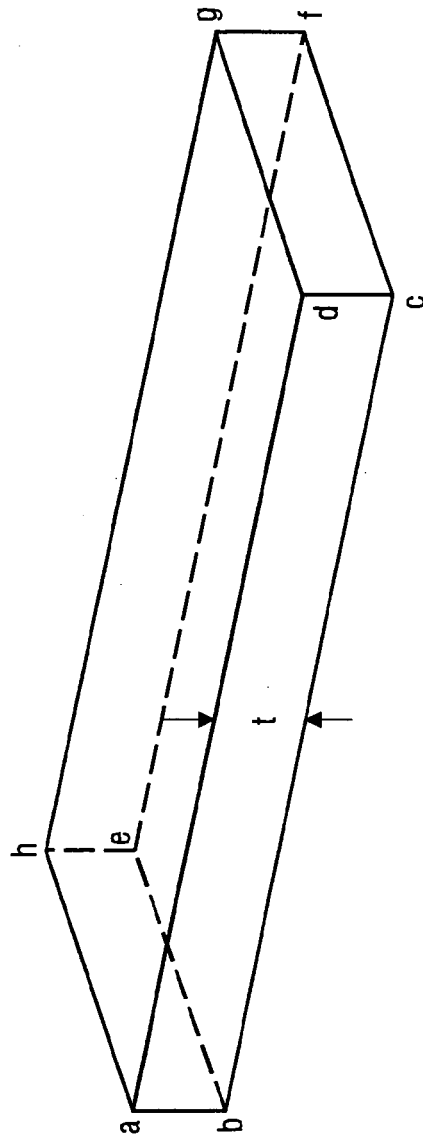


FIG. 4

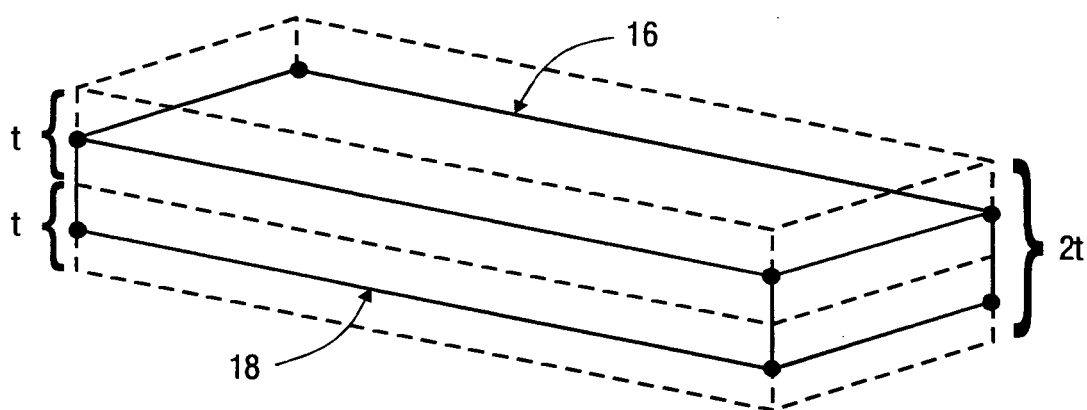


FIG. 5

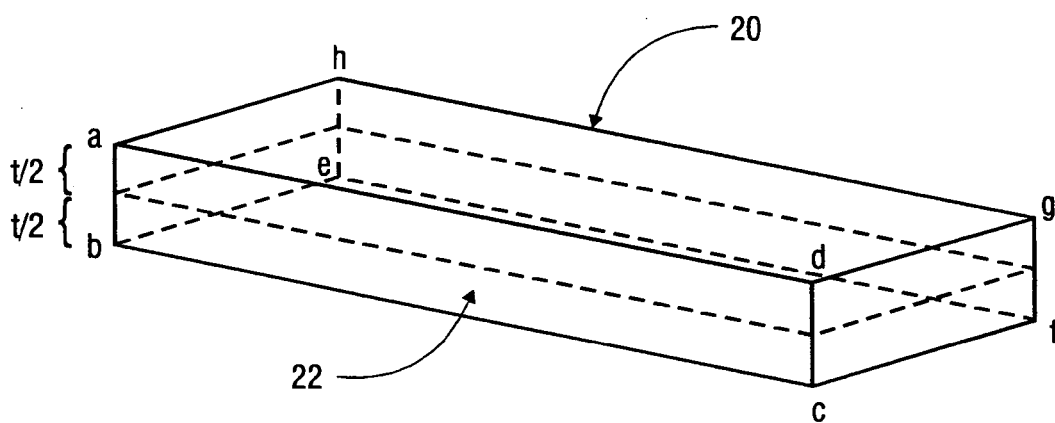
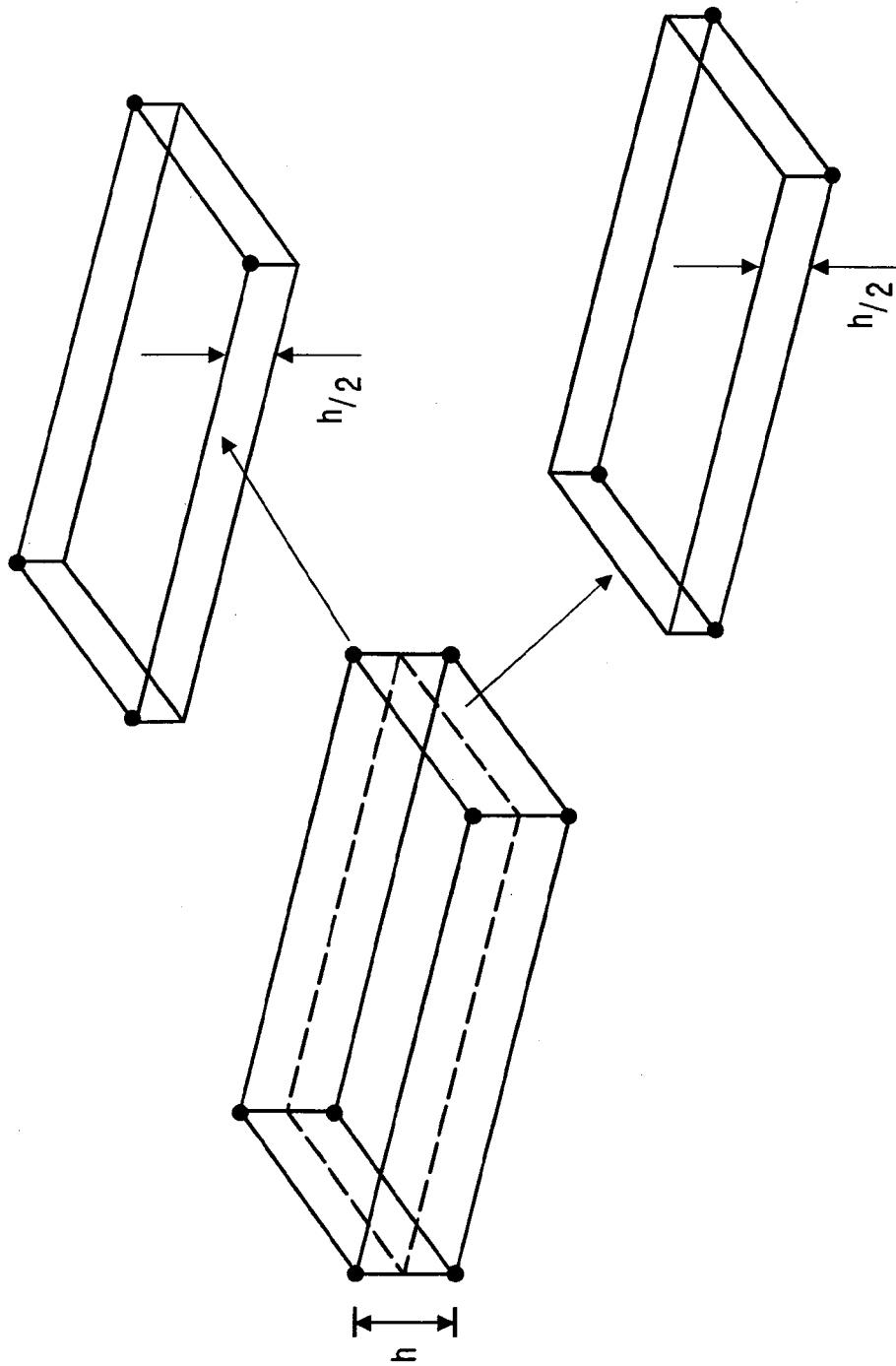


FIG. 6



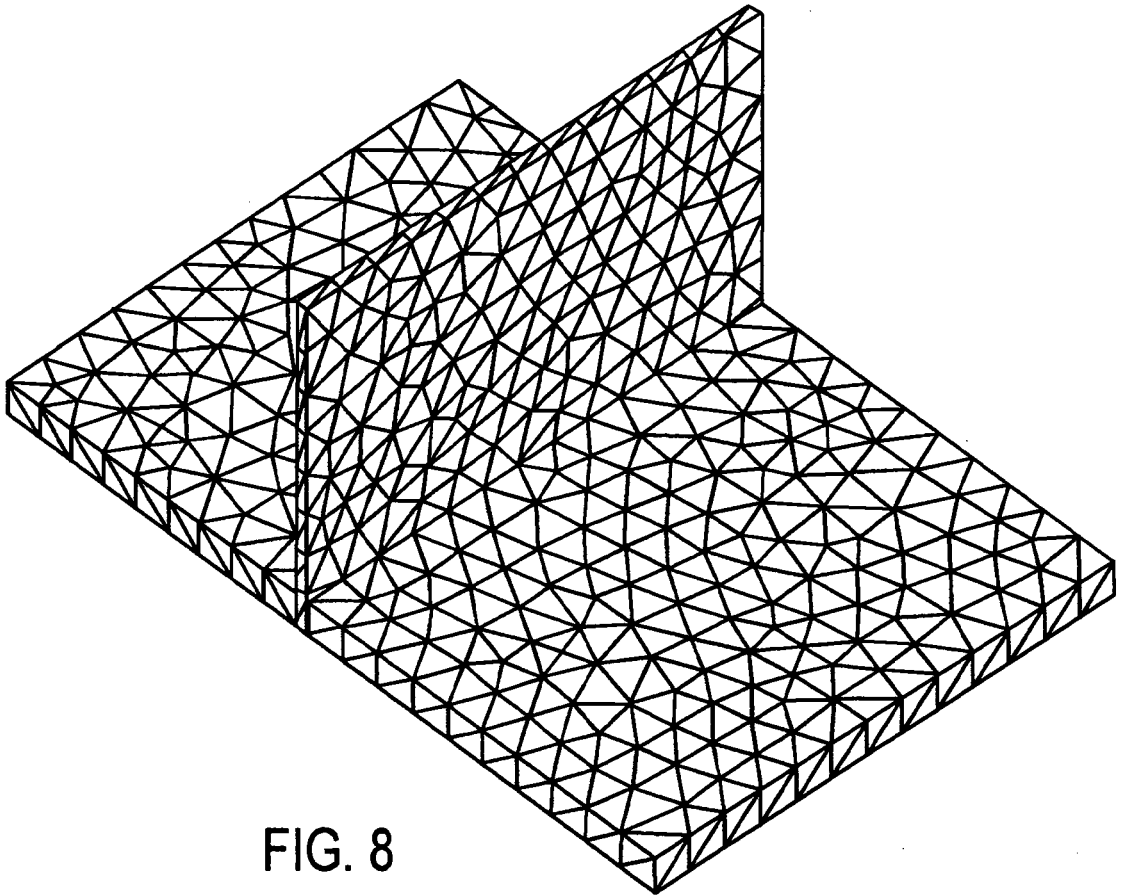


FIG. 8

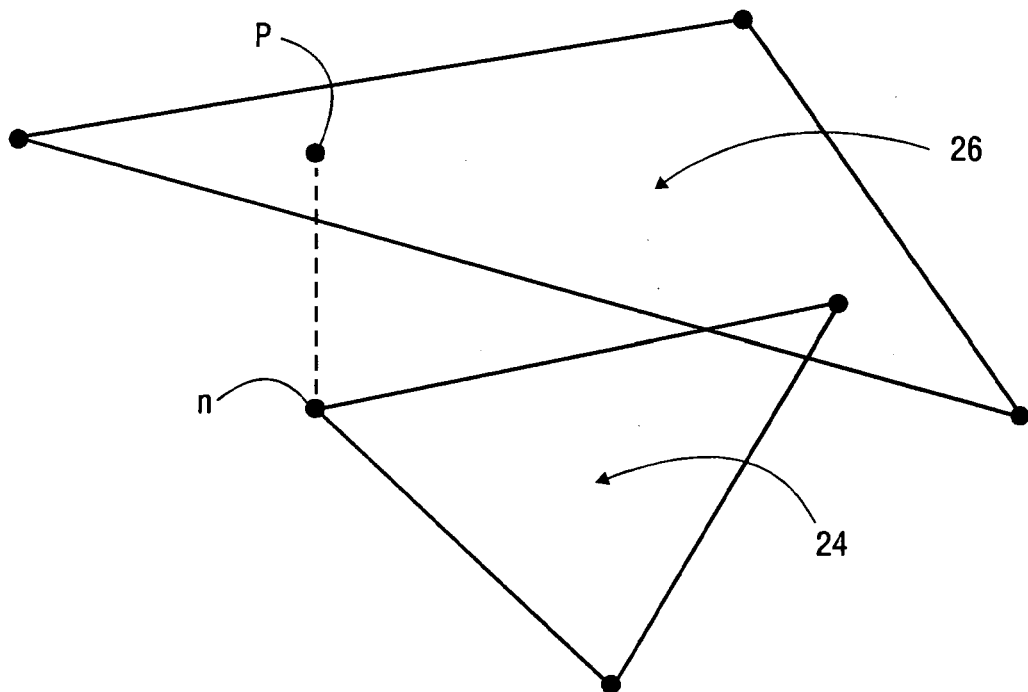


FIG. 9

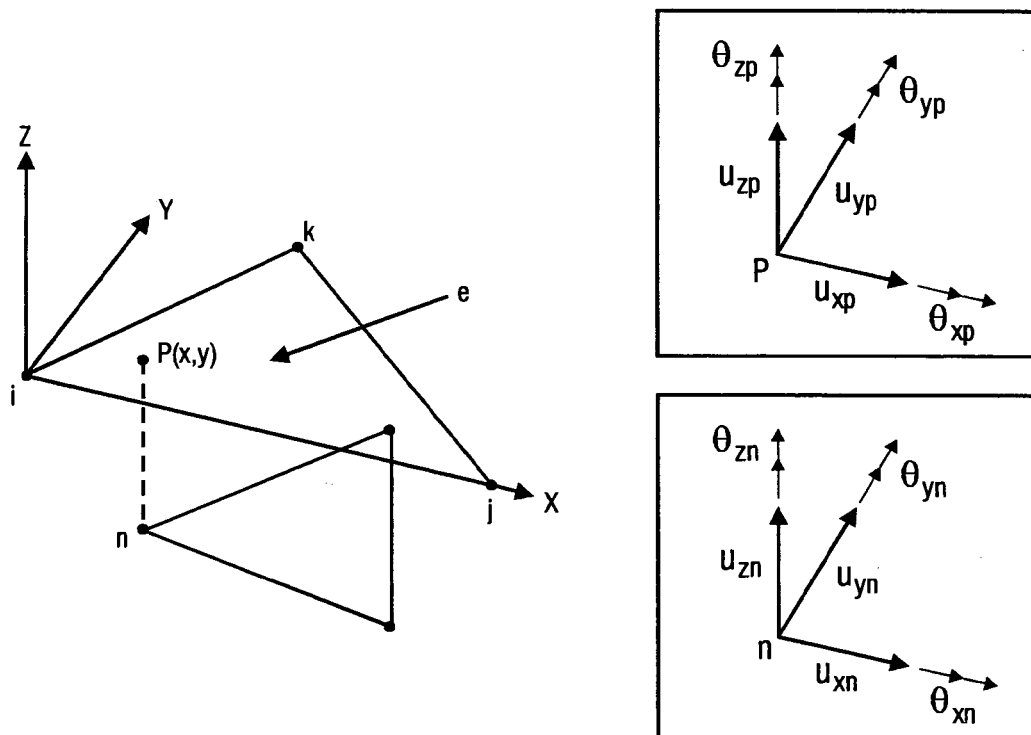


FIG. 10

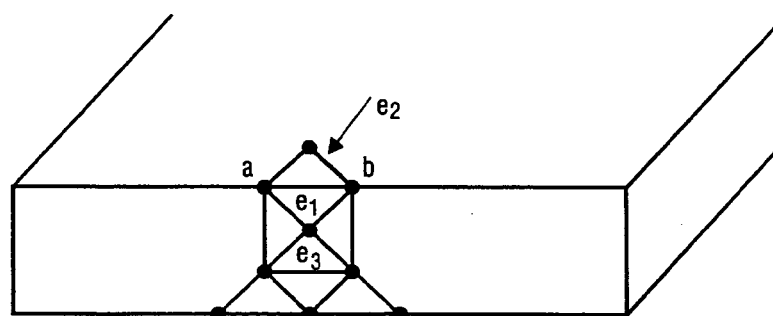


FIG. 11

## Resumo

"MÉTODO, APARELHO E MÍDIA PARA ANÁLISE ESTRUTURAL DE OBJETO", onde as tensões em um objeto são modeladas pela análise finita de elementos, através de elementos ocos opostos (20, 22) definidos em uma malha de superfície. A malha de superfície é gerada sobre uma representação da superfície exterior do objeto; uma pluralidade de elementos ocos excêntricos (20, 22) é definida por nós (a, b, c, d, e, f, g, h) na superfície exterior, com espessuras iguais à metade da espessura do objeto nos elementos ocos (20, 22); restrições de múltiplos pontos são estabelecidas entre os elementos ocos opostos correspondentes dos nós (20, 22); condições limítrofes e condições de carga tais como cargas dinâmicas, estáticas ou térmicas são especificadas; e o deslocamento, o esforço e a tensão correspondentes são calculados. O método é aplicável, por exemplo, à análise estrutural e de deformação das peças moldadas a injeção que possuem paredes finas.