UM SISTEMA CONFIGURÁVEL ADAPTATIVO PARA SIMULAÇÃO DE PROBLEMAS BIDIMENSIONAIS DE MECÂNICA COMPUTACIONAL

Eduardo Setton Sampaio da Silveira,
Marcelo Tílio Monteiro de Carvalho e
Luiz Fernando Martha

PUC-Rio – Pontíficia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Departamento de Engenharia Civil e ICAD – Laboratório de CAD inteligente
Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea
22453-900 Rio de Janeiro, RJ, Brasil

e-mail: setton,tilio,lfm@icad.puc-rio.br

SUMÁRIO

Este trabalho propõe um ambiente adaptativo, extensível e configurável para simulação de problemas bidimensionais de mecânica computacional utilizando o método dos elementos finitos. O ambiente consiste basicamente de um modelador e um sistema configurável que permite ao usuário a configuração dos atributos utilizados de acordo com o tipo de simulação desejada, utilizando uma linguagem de extensão acoplada e interpretada, com alto poder de expressão. A configuração é feita sem a necessidade de recompilação e religação do sistema.

1. INTRODUÇÃO

A utilização dos métodos numéricos para análise de problemas em engenharia tem crescido muito nos últimos anos e o método dos elementos finitos tem sido um dos mais utilizados atualmente devido principalmente aos bons resultados obtidos e a sua aplicação em uma grande variedade de problemas em mecânica computacional. Como exemplo estão problemas de análise estrutural de peças mecânicas (estudo de deslocamentos e tensões), problemas envolvendo mecânica dos fluídos, análise térmica, entre outros.

Todos estes tipos de análise têm em comum o fato de que se baseiam na solução de um problema de equações diferenciais parciais que na grande maioria das vezes não têm solução analítica e sua solução tem que ser obtida via métodos numéricos. De uma forma geral, o método dos elementos finitos requer a geração de um modelo numérico que consiste, basicamente, de uma discretização do domínio e dos atributos associados ao tipo de problema a ser resolvido. Como a discretização do domínio é independente do tipo de análise, o que caracteriza uma simulação de mecânica computacional são os atributos associados ao tipo de análise. Em um problema de elasticidade plana, por exemplo, os

atributos relativos são: condições de suporte, carga concentrada, carga distribuída, deslocamentos prescritos, entre outros. Um problema de análise térmica, por sua vez, tem como alguns dos seus atributos fluxo de calor e temperatura.

Os sistemas existentes utilizados para simulação numérica, normalmente, são muito específicos para um determinado tipo de análise, o que muitas vezes dificulta ou até mesmo inviabiliza a sua utilização em outros tipos de análise. Isto porque a consideração dos atributos da simulação está intrinsicamente ligada às atividades de modelagem, geração de malha, análise numérica e visualização.

O sistema apresentado neste trabalho foi desenvolvido com o objetivo de oferecer um ambiente onde, além de permitir a realização de todas as fases envolvidas em um processo de simulação adaptativa dentro de uma única interface, existe a flexibilidade do tratamento de diversos tipos de análise através da configuração, pelo usuário, dos atributos envolvidos na análise a ser realizada. A extensão e configuração dos atributos de simulação são feitas utilizando uma linguagem acoplada e interpretada, com alto poder de expressão. A configuração é feita sem a necessidade de recompilação e religação do sistema.

2. SIMULAÇÃO ADAPTATIVA DE MECÂNICA COMPUTACIONAL BASEADA EM GEOMETRIA

O processo adaptativo descrito nesta seção resume desenvolvimentos anteriores do grupo de pesquisa (Cavalcante, 1994) e que foram estendidos neste trabalho.

O processo de simulação pode ser dividido em algumas etapas conforme mostrado na Fig. 1. Este processo é iniciado com a especificação da geometria e dos atributos do modelo, onde o usuário descreve o modelo geométrico que é formado por componentes com geometria bem definida e por relações de conectividade entre estes componentes (topologia). Além da geometria e da topologia são necessárias ainda informações adicionais para descrição completa do problema físico a ser analisado. Essas informações são referenciadas no decorrer deste trabalho como atributos do modelo. Grande parte destes atributos é aplicada diretamente sobre as entidades do modelo geométrico criado. Este procedimento de associar atributos diretamente às entidades geométricas do modelo caracteriza uma *simulação baseada em geometria* (Shephard e Finnigan, 1988). Este tipo de abordagem oferece algumas vantagens, entre as quais um melhor suporte para a automação completa do processo e a simplificação da geração do modelo para a simulação.

A partir da definição da geometria, o processo continua com a geração automática da malha, onde é feita uma discretização do modelo geométrico. Isto resulta na criação dos nós e elementos que associados a seus respectivos atributos compõem a malha a ser analisada. Em seguida, é feito o mapeamento dos atributos associados ao modelo geométrico para a malha gerada. Este mapeamento é feito automaticamente, onde as entidades da discretização (nós e elementos) herdam os atributos associados ao modelo geométrico (Shephard e Finnigan, 1988).

Após a geração do modelo discretizado, procede-se com a análise numérica do problema, onde são processados os dados para a obtenção dos resultados da simulação. De posse dos resultados, faz-se uma verificação dos valores obtidos, e caso estes não sejam satisfatórios, refina-se a malha utilizada, onde mais uma vez os atributos serão herdados do modelo geométrico pela nova discretização gerando então um novo modelo discretizado para que seja efetuada nova análise. Este ciclo se repete até que um determinado critério de convergência seja atendido.

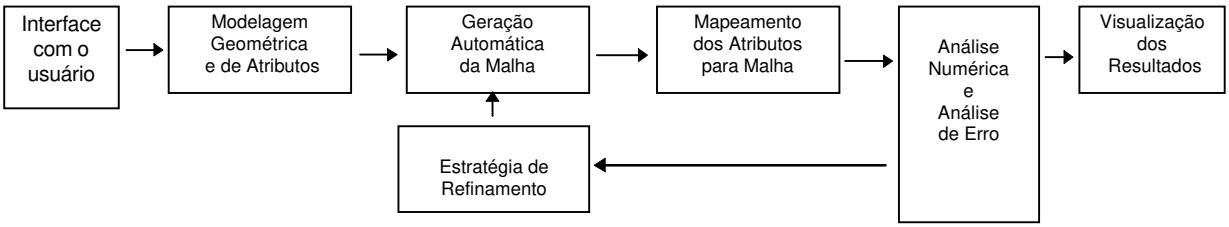

Figura 1 - Sistema automático para simulação adaptativa baseada em geometria.

3. UM SISTEMA EXTENSÍVEL PARA CONFIGURAÇAO DE ATRIBUTOS DE MECÂNICA COMPUTACIONAL

O desenvolvimento do sistema adaptativo, dentro de um ambiente configurável, onde o usuário tenha a possibilidade de especificar os tipos de atributos a serem utilizados para uma determinada análise, tornou-se viável com a utilização do sistema ESAM (*Extensible System of Attributes Management*) proposto por Carvalho (1995) e implementado durante o desenvolvimento deste trabalho.

O ESAM é um sistema, que integrado a uma aplicação (modelador), faz o gerenciamento dos atributos utilizados no modelo. Tornando, assim, a aplicação configurável no que diz respeito a parte de atributos. O ESAM consiste, basicamente, de um conjunto de funções que oferecem serviços para a configuração da aplicação, de um conjunto de classes (dentro do paradigma de programação orientada a objetos) que representa a biblioteca básica da parte configurável da aplicação e de um conjunto de funções responsáveis pela interface entre este sistema e a aplicação.

Este sistema foi desenvolvido com a utilização uma linguagem interpretada, chamada LUA (Ierusalimschy et al., 1994; Figueiredo et al., 1994), que apresenta uma sintaxe muito simples e que pode ser facilmente aprendida. É através desta linguagem que o usuário poderá configurar a aplicação, especificando novos atributos sem precisar conhecer detalhes sobre a aplicação e sem a necessidade de recompilação do sistema.

O sistema ESAM oferece ainda uma ferramenta denominada *Browser* que permite ao usuário o acesso às classes existentes no sistema, permitindo a criação de novas classes de atributos ou a redefinição de métodos, no caso de classes de geometria (Silveira, 1995). O *Browser* é uma interface que facilita a manipulação e visualização do arquivo de configuração do sistema.

4. SIMULAÇÃO ADAPTATIVA CONFIGURÁVEL

O processo adaptativo descrito na seção 2 (Cavalcante, 1994) foi tornado configurável a partir da integração com o sistema ESAM. Para realizar esta integração, foram implementadas funções que fazem a ligação de uma aplicação com o ESAM. Estas funções, denominadas funções MIS (*Modeling Interface Specification*), são pré-definidas, com nomes e API (*Application Program Interface*) definidos pelo ESAM. O programador integrador fica com a responsabilidade de preencher (implementar) as funções MIS, que passam as informações sobre a aplicação requisitadas pelo ESAM.

Além da implementação destas funções, é necessário também colocar à disposição do usuário, através da aplicação, os serviços oferecidos pelo ESAM. Estes serviços, obviamente, estão relacionados com a manipulação dos atributos do modelo. É através

destes serviços que o usuário pode definir e especificar os atributos a serem associados ao modelo.

Nas subseções que se seguem, será mostrada a forma como foi feita a integração do ESAM com o modelador e a funcionalidade do sistema configurável proposto, dentro do contexto de uma simulação adaptativa baseada em geometria para problemas bidimensionais de mecânica computacional.

4.1 MODELAGEM GEOMÉTRICA E ASSOCIAÇÃO DOS ATRIBUTOS

O modelador geométrico utilizado pelo sistema consiste basicamente de um gerenciador de subdivisões do espaço bidimensional. A criação e manutenção da geometria de um modelo físico são feitas, da forma mais natural possível, através da inserção de vértices e curvas com reconhecimento automático das regiões criadas. Para a implementação deste modelador utilizou-se a biblioteca HED (Martha, 1993), que utiliza a estrutura de dados topológica *half-edge* (Mäntylä, 1988).

O processo de criação da geometria é bastante simples e eficiente, oferecendo ao usuário muitos recursos para a geração do modelo a ser analisado.

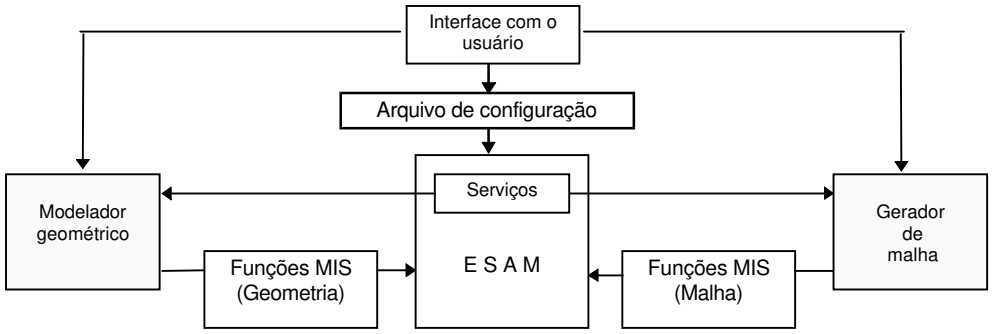

Figura 2 - Integração do ESAM com o modelador.

O modelador geométrico foi integrado ao sistema ESAM (Fig. 2), que gerencia todas as informações relativas aos atributos, desde a sua definição até o formato de entrada e saída em arquivos contendo informações a respeito dos atributos.

Para a integração do modelador geométrico com o sistema ESAM foram implemetadas as funções MIS relativas à parte de geometria (Fig. 2). Como exemplo de algumas destas funções tem-se uma função, mostrada abaixo, que informa ao sistema ESAM quais as entidades geométricas que estão selecionadas. Uma outra função informa quais os tipos de entidades geométricas que são utilizadas pelo modelador. Estas e outras funções são apresentadas em (Silveira,1995).

```
// retorna uma lista "ent" de entidades selecionadas.
função MisGetEntSel( )
{
 percorre lista de faces selecionadas
  {
   preenche campo id da lista "ent" com o valor da identificador da face corrente.
   preenche campo type da lista "ent" com o número correspondente ao tipo FACE.
   }
   ... // repete-se para os outro tipos de entidades (curvas e vértices)
}
```

Conforme mencionado anteriormente, além da implementação dessas funções, foi necessário colocar os serviços oferecidos pelo sistema ESAM à disposição do usuário através da aplicação, de forma que os serviços de gerenciamento de atributos sejam oferecidos juntamente com os serviços de modelagem geométrica através de uma interface com o usuário única. Os serviços de especificação e associação dos atributos às entidades geométricas (Fig. 3) são alguns dos serviços oferecidos pelo ESAM. As listas com a relação completa das funções MIS e com serviços oferecidos pelo sistema ESAM são apresentadas em (Silveira, 1995).

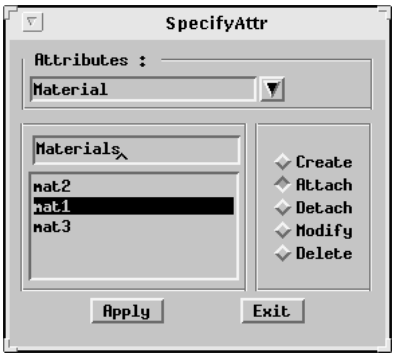

Figura 3 - Serviço oferecido pelo ESAM utilizado pelo modelador.

Feita a integração, o módulo responsável pela geração da geometria permite também que o usuário possa aplicar os atributos relativos a cada entidade geométrica criada. Isto acontece dentro de um ambiente configurável, proporcionado pelo ESAM, onde o usuário pode configurar os atributos a serem aplicados ao modelo dependendo do tipo de análise desejada. Esta configuração acontece de uma maneira simples, através da linguagem de configuração utilizada, sem a necessidade do conhecimento detalhado sobre a tecnologia sob a qual foi implementada a modelagem geométrica.

A Fig. 5 ilustra a geração do modelo geométrico e a aplicação dos atributos associados a este modelo dentro do sistema integrado proposto.

4.2 GERAÇÃO AUTOMÁTICA DA MALHA INICIAL

Com a descrição completa da geometria e dos seus atributos associados, inicia-se então a fase seguinte do processo que é a geração automática da malha inicial (Fig. 6). O algoritimo utilizado para geração da malha pelo foi desenvolvido por Cavalcante (1993).

A geração da malha inicial é feita a partir do modelo geométrico criado e é baseada em um parâmetro de controle fornecido pelo usuário. Este parâmetro de controle é um valor que define a discretização do contorno da geometria do modelo necessária ao algoritimo de geração de malha utilizado.

Para a integração do módulo de geração de malha com o sistema ESAM, foram implementadas as funções MIS relativas à malha (Fig. 2). Estas funções fornecem ao ESAM informações a respeito do modelo de elementos finitos gerado. Como exemplo de algumas destas funções, pode-se citar uma função que retorna a lista de nós existentes no modelo, uma outra função que dado o identificador do nó retorna suas coordenadas e uma função que retorna a lista de elementos do modelo, entre outras.

De forma semelhante ao que foi feito para a integração do módulo de modelagem geométrica, além da implementação das funções MIS, alguns serviços associados ao modelo numérico foram colocados à disposição do usuário. Por exemplo, o serviço que permite ao usuário escolher o formato do arquivo de saída contendo as informações relativas ao modelo numérico (malha+atributos).

4.3 MAPEAMENTO DOS ATRIBUTOS PARA A MALHA

Nesta fase fica evidente uma das vantagens na utilização da simulação baseada em geometria citada anteriormente, onde o mapeamento dos atributos do modelo geométrico para a discretização (nós e elementos) é feito automaticamente através do mecanismo de herança. Ou seja, a discretização herda, automaticamente, os atributos do modelo geométrico. O ESAM possue as informações relativas à geometria e a discretização do modelo, obtidas através das funções de ligação entre os sistemas. De posse dessas informações, o sistema ESAM é responsável pelo mapeamento dos atributos da geometria para a discretização gerada.

O mapeamento dos atributos do modelo geométrico para a discretização considera quatro casos (Calvalcante, 1994): atributos aplicados em vértices (nível geométrico) que serão herdados automaticamente pelos nós (nível de malha), atributos aplicados sobre as curvas que serão herdados pelos nós que estão sobre estas, os atributos sobre as curvas que vão para os lados dos elementos adjacentes às curvas e, finalmente, os atributos que são aplicados às regiões que são herdados pelos elementos que estão nas mesmas.

Os atributos que são aplicados diretamente sobre vértices são condições de suportes, deslocamentos prescritos e forças concentradas, por exemplo. Os vértices geométricos correspondem aos pontos extremos de curvas e sobre eles estão nós que serão sempre mantidos na estratégia de refinamento utilizada.

Os nós do segundo caso citado acima são gerados sobre curvas geométricas do modelo cada vez que uma nova malha é gerada. Os atributos aplicados sobre as curvas são herdados pelos nós que estão sobre as mesmas. Neste caso, o sistema transfere automaticamente e de forma consistente os atributos da curva para os nós sobre ela.

Para o terceiro caso, onde os atributos são aplicados às curvas são mapeados para os lados dos elementos adjacentes a elas, o tratamento dos atributos é feito de forma semelhante. Faz-se uma verificação dos elementos adjecentes à curva, e os atributos da curva são herdadados automaticamente pelo lado do elemento correspondente.

Um procedimento muito parecido é utilizado para o último caso, onde os atributos associados às regiões são herdados pelos elementos que estão sobre elas.

Feito o mapeamento dos atributos está gerado o modelo numérico a ser analisado. As informações sobre este modelo são gravadas em um arquivo e a geração deste arquivo é mais um serviço oferecido pelo sistema ESAM. O formato deste arquivo também é configurável.

4.4 ANÁLISE NUMÉRICA, REFINAMENTO DA NOVA MALHA E VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS

Gerado o modelo de elementos finitos, o sistema está preparado para a fase de análise numérica do problema. O módulo de análise por elementos finitos usado no sistema foi desenvolvido sob uma filosofia de programação orientada a objetos em trabalho anterior desta linha de pesquisa (Guimarães, 1992). Para este trabalho foi necessária a expansão do módulo que procede análise de erro. Este módulo, inicialmente, tratava apenas problemas de elasticidade plana, e foi expandido de modo a tratar também problemas térmicos. Esta expansão foi feita com muita facilidade, sem alteração da estrutura anterior do programa.

Após a análise numérica, faz-se uma verificação dos resultados obtidos, verificando se o erro de discretização obtido é menor que o erro admitido pelo usuário. Caso não seja, é feito um refinamento da malha utilizada baseado na estimativa de erro de cada elemento. O algoritimo utilizado para o refinamento da malha consiste numa combinação das técnicas de *quadtree* e de triangulação de Delaunay (Cavalcante, 1993). Este ciclo continua até que o erro obtido seja menor que o erro admitido pelo usuário.

A visualização dos resultados obtidos é feita dentro da mesma interface e permitindo ao usuário o acesso a informações quantitativas (número de nós, incidência dos elementos, etc.) e qualitativas (representação gráfica de resultados escalares).

5. EXEMPLOS E CONCLUSÃO

São mostrados dois exemplos de utilização do sistema apresentado com o objetivo de ilustrar sua generalidade, obtida através da integração do modelador com o sistema ESAM.

São apresentados dois tipos de problemas diferentes, um problema envolvendo análise de tensões e um outro problema envolvendo uma análise térmica. São mostradas as fases do processo de simulação, ilustrando as diferenças entre os dois tipos de análise dentro do contexto da utilização do sistema pelo usuário.

5.1 ANÁLISE DE TENSÕES

O primeiro exemplo é uma placa em L mostrada na Fig. 4, submetida a um carregamento lateral unitário. É considerado estada plano de tensões, com módulo de elasticidade $E = 10^3$ e coeficiente de Poisson $\nu = 0.3$.

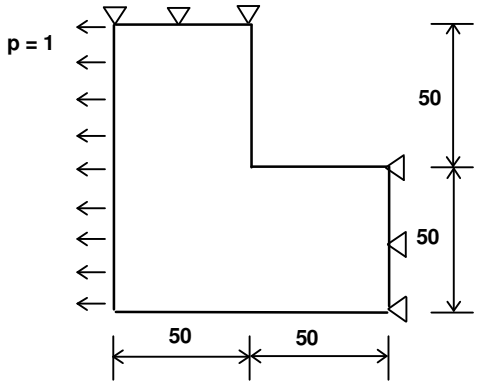

Figura 4 - Placa em L.

Os atributos do modelo físico envolvidos neste problema são os seguintes :

- Material isotrópico definido através dos valores do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson.
- Carregamento uniforme definido valores do carregamento nas direções x e y.
- Condições de suporte caracterizadas pela restrição ou liberdade de deslocamentos nas direções x e y.

Inicialmente cabe ao usuário a definição do modelo geométrico e a associação dos atributos às entidades geométricas (Fig. 5). Definido este modelo, o processo tem continuidade com a geração automática da malha inicial (Fig. 6) a partir da definição de alguns atributos de malha, como o tipo de elemento a ser utilizado, o tipo de análise a ser realizada e o erro admissível desejado pelo usuário, além de um parâmetro de controle utilizado para a geração da malha. Para este exemplo foram utilizados elementos T3 e admitiu-se um erro de até 10%.

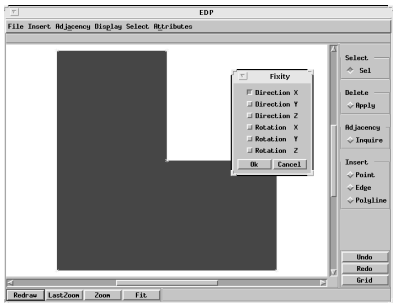

Figura 5 - Geração da geometria.

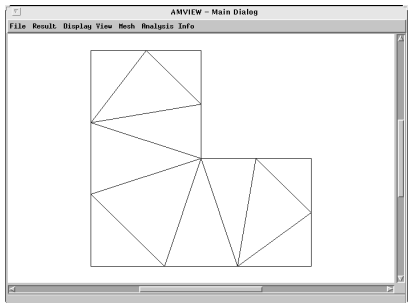

Figura 6 - Malha inicial.

Gerado o modelo numérico, o processo tem continuidade com a análise numérica do problema, análise de erro e refinamento da malha (Fig. 7) até que o erro envolvido seja menor que o erro dado pelo usuário. Em seguida, pode-se visualizar os resultados da análise dentro do mesmo ambiente onde foi realizado todo o processo (Fig. 8).

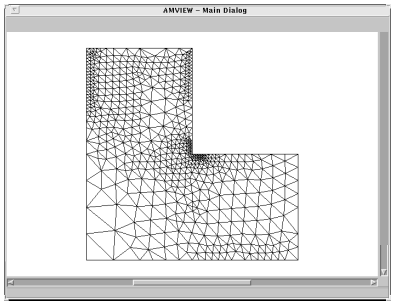

Figura 7 - Refinamento da malha.

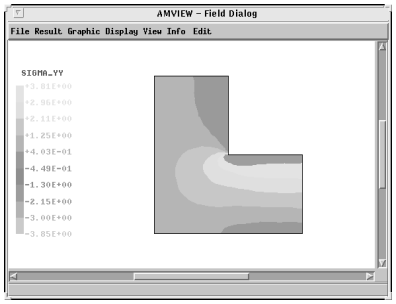

Figura 8 - Visualização dos resultados.

5.2 ANÁLISE TÉRMICA

O segundo exemplo é uma chapa retangular com material que apresenta condutividade térmica k = 1.0 submetida as temperaturas **T** e a um fluxo de calor **q**, indicados na Fig. 9.

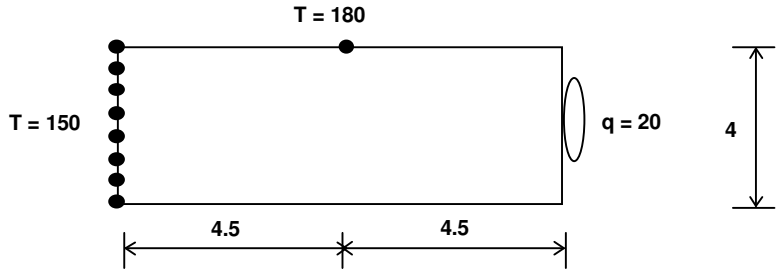

Figura 9 - Chapa aquecida.

Para este exemplo pode-se notar que os atributos do modelo são diferentes dos apresentados no exemplo anterior. Os atributos associados a este modelo são os seguintes:

- Material definido pela condutividade térmica.
- Temperatura prescrita definida por seu valor escalar.
- Fluxo de calor também definido por seu valor escalar.

Todo o processo de geração do modelo é semelhante ao exemplo anterior, a diferença básica são os atributos utilizados. Para que esta análise térmica fosse possível foi

necessário apenas a configuração destes atributos (temperatura, fluxo e material) através da linguagem de configuração LUA e sem a necessidade de recompilação e religação do sistema. Com o objetivo de ilustrar como é feita esta configuração, será mostrado abaixo como foi criado o atributo temperatura, no arquivo de configuração, para a modelagem deste exemplo. A sintaxe mostrada abaixo é a sintaxe da linguagem LUA (Figueiredo et al., 1994; Ierusalimschy et al, 1995) e do *toolkit* EDG (Celes, 1994). A variável **T** corresponde ao parâmetro do diálogo utilizado para a captura dos dados do objeto. A variável ***self*** corresponde ao objeto corrente.

```
TEMPERATURE = crtclass { parent = MATERIAL, name = "Temperature",
                         vars = { "t" }, vtype = { "f" } }

-- método que constrói o diálogo para capturar o parâmetro do atributo
function TEMPERATURE:CrtDlg()
T = field { prompt=" T = " }
end

-- método para validação do parâmetro capturado
function TEMPERATURE:Validate()
 if type(T.value) ~= "number" then
  ed_message("","Invalid value to T")
  return nil
 end
end

-- método que coloca nos campos do diálogo os valores da váriavel do objeto
function TEMPERATURE:ValueToDlg()
 if type(T.value) ~= "number" then
  ed_message("","Invalid value to T")
  return nil
 end
end

-- método que transporta os valores fornecidos pelo usuário para a variável do objeto
function TEMPERATURE:ValueFromDlg()
 self.e = E.nvalue
end
```

O mesmo procedimento vale para os outros atributos associados a este tipo de análise (fluxo de calor e material).

O restante do processo foi inteiramente análogo ao exemplo anterior. Para este exemplo utilizou-se também o elemento T3 e considerou-se um erro admissível da ordem de 10%. As Figs. 10-13 mostram as etapas do processo de simulação para este exemplo.

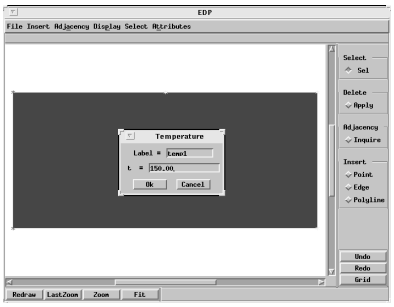

Figura 10 - Modelo geométrico.

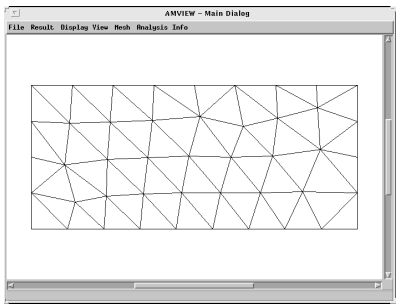

Figura 11 - Malha inicial.

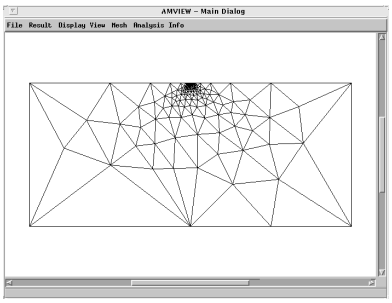

Figura 12 - Refinamento da malha.

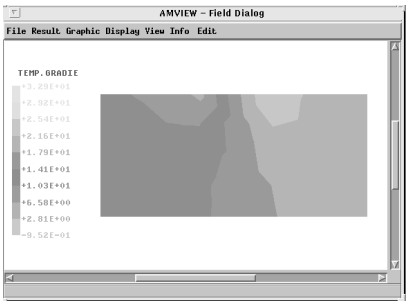

Figura 13 - Visualização dos resultados.

Este exemplo ilustra bem o poder de modelagem do sistema apresentado, visto que foi possível a realização de um outro tipo de simulação através da simples configuração dos atributos associados ao tipo de análise desejada.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de CAD Inteligente - ICAD (PUC-Rio). E os autores agradecem ao Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica - TeCGraf (PUC-Rio) pelo suporte e infra-estrutura fornecidos para o desenvolvimento deste trabalho. Este trabalho teve auxílio parcial do projeto temático GEOTEC do CNPq.

REFERÊNCIAS

Carvalho, M.T., 1995, “Uma Estratégia para o Desenvolvimento de Aplicações Configuráveis em Mecânica Computacional”, Tese de Doutorado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Cavalcante Neto, J.B., 1994, “Simulação Auto-adaptativa Baseada em Enumeração Espacial Recursiva de Modelos Bidimensionais de Elementos Finitos”, Tese de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Cavalcante Neto, J.B., Carvalho, M.T.M e Martha, L.F., 1993 - “Geração Auto-Adaptativa de Malhas de Elementos Finitos Utilizando uma Técnica de Enumeração Espacial Recursiva”, anais do XIV CILAMCE, São Paulo-SP, pp. 1285-1294.

Celes Filho, W., 1995, “Sistema EDG - Manual de Programação”, TeCGraf, PUC-Rio.

Guimarães, L.G.S., Menezes, I.F.M. e Martha, L.F., 1992, “Disciplina de Programação Orientada a Objetos para Sistemas de Elementos Finitos”, anais do XIII CILAMCE, Porto Alegre-RS, vol. 1, pp. 342-351.

Ierusalimschy, R, Figueiredo, L. e Celes, W., 1995, “Reference Manual of the Programming Language LUA 2.1”, Departamento de Informática, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Mäntylä, M., “An Introduction to Solid Modeling”, Computer Science, Inc., Maryland, 1988.

Martha, L.F., Carvalho, P.C.P.; Celes F; Ferraz, M., 1993, “Gerenciamento de Subdivisões do Plano Usando HED”, Caderno de Ferramentas do VII Simpósio Brasileiro de Engenharia de Software, PUC-Rio/SBC, Rio de Janeiro, pp. 51-52.

Silveira, E.S.S., 1995, “Um Sistema Configurável para Simulação Adaptativa Bidimensional de Mecânica Computacional”, Tese de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Shephard, M.S. e Finnigan, P.M., 1988, “Integration of Geometric Modeling and Advanced Finite Element Preprocessing”, Finite Elements in Analysis and Design, vol. 4, pp. 147-162.