

## VETORIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE ELEMENTOS FINITOS NO SUPER COMPUTADOR CRAY

Prof<sup>a</sup>. Maria Inês Gobbo dos Santos  
 Prof. Ademar Gilberto Groehs  
 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFRGS  
 Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3<sup>o</sup> andar  
 90550-035 - Porto Alegre - RS

### ABSTRACT

*This work presents the effort done to vectorize the solver of the Finite Element Sistem GAELI developed in U.F.R.G.S. The modifications introduced in the main algorithms of the solver made it possible to achieve significant improvements in the overall efficiency of the program when running in a CRAY computer.*

### RESUMO

*A presença de um super computador CRAY com capacidade de vetorização e paralelização, trouxe a necessidade da reformulação dos programas já desenvolvidos de forma a se adequarem a arquitetura do novo computador. Dentre estes programas, o GAELI tem especial importância por ser um sistema de Elementos Finitos com capacidade para realizar análise estática e dinâmica de estruturas lineares dos mais variados tipos. Este trabalho apresenta o processo de vetorização do SISTEMA GAELI.*

### INTRODUÇÃO

O sistema GAELI é um programa de Elementos Finitos desenvolvido para operar em microcomputador de arquitetura escalar e memória limitada. As limitações de memória levaram ao desenvolvimento de um sofisticado sistema de solução de equações lineares "out of core" com o objetivo de aumentar a capacidade do programa. No entanto, para muitos problemas de engenharia, a capacidade de um micro computador ou mesmo de uma estação de trabalho é insuficiente para chegar a solução em um tempo computacional tolerável.

Com a aquisição do super computador CRAY pela UFRGS, tornou-se viável a transferência do GAELI para esta nova plataforma. No entanto, alterações nos algoritmos de solução deveriam ser feitas para tornar o sistema compatível com a arquitetura vetorial do CRAY.

O uso do método dos Elementos Finitos envolve uma quantidade bastante grande de operações computacionais. Um programa típico consiste de alguns módulos bastante conhecidos como:

- a) geração das matrizes de rigidez dos elementos;
- b) montagem e solução do sistema global de equações;
- c) cálculo das tensões ou solicitações nos elementos.

Nos problemas normais de engenharia, o módulo b corresponde em média 70 a 80% do tempo total de análise. Por outro lado, a geração das matrizes de rigidez dos elementos e o cálculo das tensões podem ser facilmente executados em paralelo sem nenhuma dificuldade, uma vez que as operações envolvidas no cálculo para um elemento são independentes dos demais. Já com relação ao módulo b, as operações são dependentes e mais complexas. Por esta razão, vamos apresentar neste trabalho apenas os aspectos de implementação do módulo b.

A solução do sistema de equações lineares envolvido na maioria dos problemas estruturais pode ser obtida por métodos iterativos de alto grau de vetorização e paralelização, mas com problemas

de convergência, ou por métodos diretos tradicionalmente usados em problemas de Elementos Finitos. Optou-se por este último tipo uma vez que se trata de um programa para diferentes tipos estruturais, eliminando-se desta forma problemas de convergência.

## 2. ALGORITMO PARA SOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES LINEARES

O algoritmo para solução do sistema de equações lineares discutidos neste trabalho, usa um esquema de armazenamento da matriz de rigidez por linha e a triangularização se dá através do método de GAUSS ou seja, na forma

$$\mathbf{A} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{U} \quad (2.1)$$

onde  $\mathbf{A}$  é uma matriz quadrada de ordem  $N$  e  $\mathbf{L}$  é uma triangular inferior com 1 na diagonal e  $\mathbf{U}$  uma triangular superior. A solução do sistema

$$\mathbf{A} \mathbf{X} = \mathbf{P} \quad (2.2)$$

é obtida resolvendo-se os sistemas triangulares:

$$\mathbf{L} \mathbf{Y} = \mathbf{P} \quad \text{e} \quad \mathbf{U} \mathbf{X} = \mathbf{Y} \quad (2.3)$$

No caso de problemas estruturais  $\mathbf{A}$  corresponde a matriz de rigidez,  $\mathbf{X}$  o vetor de deslocamentos e  $\mathbf{P}$  corresponde ao vetor de cargas.

A parte mais importante do processo de solução corresponde a montagem e decomposição da matriz de rigidez  $\mathbf{A}$ , por isso alguns aspectos importantes foram observados na implementação computacional. São eles:

- portabilidade do módulo para outras plataformas;
- eficiente incorporação da memória secundária;
- consideração do preenchimento da matriz e características de simetria e banda;
- manutenção da estrutura básica de dados já existente

O sistema GAELI encontra-se implantado e operando em computadores tipo PC e estações de trabalho, com um número significativo de usuários. A actualização de novas versões ficaria extremamente trabalhosa se não houvesse portabilidade entre as diferentes plataformas. Por isto, optou-se por utilizar um conjunto de comandos FORTRAN compatíveis com os compiladores usados.

Para problemas grandes, a memória central disponível pode não ser suficiente para armazenar a matriz de rigidez global da estrutura. Assim sendo, foi necessário incorporar ao módulo um sistema "out of core".

A maneira pela qual foi incorporado o input/output durante o processo de montagem e decomposição é através do controle da área de trabalho e de uma rotina de gravação e leitura desta área em disco.

## 3. APLICAÇÕES A PROBLEMAS ESTÁTICOS.

A seguir apresenta-se alguns exemplos que utilizamos para testar a evolução do processo de vetorização. Os exemplos são de estruturas relativamente pequenas para um super computador, mas os índices obtidos nas medidas de eficiência, serviram para orientar o processo.

## EXEMPLOS ANALISADOS

NOME	Nº. DE NÓS	Nº. DE EQUAÇÕES	BANDA MÉDIA	TIPO ELEMENTO
AN361	1508	4524	394	TRID/8
GP3	2796	8388	382	TRID/20
CASCAPOL	1476	8856	224	CASCA/4

## EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE VETORIZAÇÃO

NOME	Mflops/ Mem. Ref.	Mflops	CPU (Segs)	Ganho Relativo
AN361	-	22	31	
	-	86	7.6	4.1
	0.65	98.5	6.66	1.15 6.1
	1.12	140	5.1	1.31
GP3	-	-	-	
	-	89.7	13.2	
	0.65	108	11.	1.2 1.6
	1.13	143	8.4	1.31
CASCA	-	-	-	
	-	-	-	
	0.64	87.8	5.14	
	1.28	116	3.9	1.32

## MEDIDAS DE EFICIÊNCIA

## PROGRAMA COMPLETO

NOME	Mips	Mflops	AVL	V/S Flops	Ts (s)	Tv (s)	S=Ts/Tv
AN361	41	140	56	175	57.5	5.1	11.2
GP3	41	143	55	163	106	8.4	12.6
CASCA	45	116	50	117	42.6	3.9	10.9
CRAY YMP-2	20-100	20-300	>30 Máx 64	>>			10-20

PRINCIPAIS SUBROUTINAS  
MFLOPS

ROTINA	AN361	GP3	CASCA
RMTRT	197.8 (69.4%)	194.6 (72.2%)	194.1 (57.1%)
RTRT	168.6	163.8	136.3
DECOM	186.2	179.6	157.6
RETO	159.9	164.4	122.1
%ACUM.	70.7%	73.6%	60.5%

MFLOPS/MEM. REF.

ROTINA	AN361	GP3	CASCA
RMTRT	1.2	1.21	1.49
RTRT	0.85	0.85	0.66
DECOM	0.67	0.66	0.67
RETRO	0.94	0.93	0.90

#### 4. CONCLUSÃO

Pode-se concluir pelos valores apresentados nas tabelas anteriores que, embora se tenha mantido uma parcela do algoritmo em modo escalar, ele apresenta bons índices de vetorização e uma redução considerável no tempo total de execução. Por outro lado, a manutenção de uma parte no modo escalar, evitou mudanças substanciais na estrutura de dados básica do sistema, principalmente na parte correspondente as matrizes de rigidez dos elementos. Tais mudanças poderiam acarretar aumento no tempo total de solução nas demais plataformas que o sistema está implantado.

#### 5. REFERÊNCIAS

- ORTEGA, James M. - Introduction to Parallel and Vector Solution of Linear Systems - Plenum Press, New York, 1988.
- ORTEGA, James M.; VOIGT, Robert G. Solution of Partial Differential Equations on Vector and Parallel Computers: SIAM, vol.27, nº 2, junho de 1985.
- GOEHLICH, D.; KOMZSIK, L.; FULTON, R.E. - Application of a Parallel equation solver to static FEM Problems. Computers & Structures, vol. 31, nº 2, pp. 121-129, 1989.
- CRAY Research, Inc. - CF77 - Compiling System - FORTRAN REFERENCE MANUAL, vol.1 - 1990, 1991 - SA.
- CRAY Research, Inc. - CF77 - Compiling System - Vectorization Guide, vol.3 - 1990, 1991 - USA.