

Referências Bibliográficas

- [ADAMS] ADAMS. **The Specialized Virtual Prototyping Environment for Railcar Engineering**. California. 2.3
- [Andersen-2003] ANDERSEN, L.; NIELSEN, S.. **Vibrations of a track caused by variation of the foundation stiffness**. p. 171–184, Aalborg, Denmark, 2003. 2.3
- [Anuario] DELFT, T.. **Annual Reports**. Holanda, 1996-2001. (document), 2.3, 2.7
- [CORUS] RAIL, C.. **The Track Handbook**. California. (document), 5.10
- [Celebi-1998] CELEBI, E.; KUTANIS, M. ; FIRAT, S.. **Application of Numerical Methods for Analysis of Propagation of Vibrations generated by Moving Load**. Germany., 1998. 2.3
- [Chaves-2003] CHAVES, R. A. P.. **O método híbrido simplificado dos elementos de contorno aplicado a problemas dependentes do tempo**. 182 f. Tese de Doutorado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003. 3.3
- [DNIT] Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília, Brazil. **Ferrovias Brasileiras**. 2.1
- [Degrande-2001] DEGRANDE, G.; SCHILLEMANS, L.. **Free field vibrations during the passage of a high speed train**. p. 131–144, Lewven, Belgium., 2001. 2.3
- [Dumont-1987] DUMONT, N. A.. **The hybrid boundary element method**. In: BREBBIA, C.A.; WENDLAND, W.; KUHN, G, editor, **BOUNDARY ELEMENTS IX**, v. 1, **Mathematical and Computational Aspects**, p. 125–138, Southampton, 1987. Computational Mechanics Publications, Springer-Verlag. 3.3

- [Dumont-2001] DUMONT, N. A.; OLIVEIRA, R.. **From frequency-dependent mass and stiffness matrices to the dynamic response of elastic systems.** *Int. J. Sol. Struct.*, p. 1813–1830, 2001. 2.6, 3.6
- [Dumont-2003] DUMONT, N. A.; CHAVES, R. A. P.. **General time-dependent analysis with the frequency-domain hybrid boundary element method.** *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, n. 10, p. 431-452 2003. 1, 1.1, 2.6, 3.3, 3.4, 3.6, 4.2.2
- [Dumont-1997] DUMONT, N. A.; OLIVEIRA, R.. **The exact dynamic formulation of the hybrid boundary element method.** In: *Procs. XVIII CILAMCE-XVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, p. 357–364, 2003. 2.6
- [Dumont-2005] DUMONT, N. A.. **An advanced mode superposition technique for the general analysis of time dependent problems.** In: *ADVANCES IN BOUNDARY ELEMENT TECHNIQUES VI*, p. 333–344, England, 26-24 maio 2005. 3.6, 4.3
- [Dumont-2006] DUMONT, N. A.. **On the solution of generalized non-linear complex-symmetric eigenvalue problems.** *International Journal for Numeric Methods in Engineering*, May 2006. 2.6, 3.5
- [Dumont-2006-2] DUMONT, N. A.; OLIVEIRA, A. C.. **A dynamic interaction model of railway track structural elements.** In: *IN: PROCS. CILAMCE-2006 IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING*, p. 15 pp on CD, Belém, Brazil, 3-6 Setembro 2006. 3.1, 3.3, 3.7
- [Dumont-2006-1] DUMONT, N. A.. **On the inverse of generalized λ -matrices with singular leading term.** *International Journal for Numeric Methods in Engineering*, p. 66:571–603, 2006. 3.4, 3.7, A
- [Esveld-1997] ESVELD, C.. **Innovations in Railway Track.** Netherlands, 1997. 2.3
- [Esveld-1998] ESVELD, C.; KOK, A. W. M. ; MAN, A. P.. **Integrated numerical and experimental research of railway track structures.** *Fourth International Workshop on Design Theories and their Verification of Concrete Slabs for Pavements and Railroads*, 10-12 September 1998. (document), 2.4, 2.4.3, 2.10

- [Esveld-1998-2] ESVELD, C.; KOK, A. W. M.. **Interaction between moving vehicles and railway track at high speed**. TU Delft, 10-12 September 1998. 1.1, 2.4.3
- [Esveld-2001] ESVELD, C.. **Modern Railway Track**. MRT-Productions, Netherlands, 2001. 2, 2.2.7
- [Esveld-2002] ESVELD, C.; MAN, A. D.. **Use of railway track vibration behaviour for design and maintenance**. TU Delft, 2002. 2.3, 2.3
- [Graff-1975] GRAFF, K. F.. **Wave motion in elastic solids**. Clarendon Press, Oxford, 1975. 2.5
- [Gupta-1975] GUPTA, K. K.. **On a finite element method for free vibration analysis of structure**. p. 105–120, 1975. 2.6
- [Gupta-1976] GUPTA, K. K.. **Development of a finite dynamic element for free vibration analysis of two-dimensional structure**. p. 1311–1327, 1976. 2.6
- [Gupta-1978] GUPTA, K. K.. **Finite dynamic element formulation for a plane triangular element**. p. 1431–1448, 1978. 2.6
- [Gupta-1984] GUPTA, K. K.; ASCE, M.. **Frequency-dependent matrices for tapered beams**. volumen 112, 1984. 2.6
- [Heelis-1999] HEELIS, M.; CHAPMAN, D. ; KRYLOV, V.. **Predicting and measuring vertical track displacements on soft subgrades**. Railway Engineering, 1999. 2.3
- [Kekesi-1998] KEKESI, L.; KAZINCZY, L.. **Dynamical measurements on the ballast railway track**. Symposium in Civil Engineering, 1998. 2.3
- [Kolusek-1973] KOLUSEK, V.. **Dynamics in Engineering Structural**. Butterworths, 1973. 2.5
- [Krylov-2000] V. V. KRYLOV, A. R. DAWSON.2, M. E. H.; COLLOP, A. C.. **Rail movement and ground waves caused by high speed trains approaching track soil critical velocities**. volumen 214 Part F, 2000. 2.3
- [Lichtberger-2001] LICHTBERGER, B.. **Track maintenance strategies for ballasted track - a selection**. Netherlands, 2001. 2.3

- [Martin-2003] MARTIN, X. D.; TORBJÖRN, E. ; WIBERG, N. E.. **An integrated vehicle-track-ground model for investigating the wheel-rail dynamics forces due to high axle loads.** 6th International on Contact mechanics and Wear of Rail Wheel Systems (CM2003), 10-13 junho 2003. (document), 1.1, 2.3, 2.3, 2.4, 2.4.2, 2.9, 2.4.2, 2.4.2
- [Niakas-2001] NIAKAS, T. N.; PAPADOPOULOS, C. A.. **Parametric study of the response of a rail track.** First Nat. Conf. on Recent Advances in Mech. Eng., 17-20 September 2001. (document), 1.1, 2.3, 2.4, 2.4.1, 2.8, 2.4.1
- [Nilsen-1995] NIELSEN, J. C. O.; IGELAND, A.. **Vertical dynamic interaction between train and track influence of wheel and track imperfections.** Journal of Sound and Vibration, p. 714–728, 1995. 2.3
- [Paz-1975] PAZ, M.; DUNG, L.. **Power series expansion of the general stiffness matrix for beam elements.** p. 449–459, 1975. 2.6
- [Prazeres-2005] PRAZERES, P. G. C.. **Desenvolvimento de elementos finitos híbridos para a análise de problemas dinâmicos usando superposição modal avançada.** 172 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. 3.3
- [Przemieniecki-1968] PRZEMIENIECKI, J. S.. **Theory of Matrix Structural Analysis.** Dover Publications, New York, 1968. 2.6, 3.4
- [Rail-One] RAIL ONE GmbH Pfeiderer track systems, Neumarkt, Germany. **Railway Technology.** (document), 2.4, 2.2.6
- [Railway-2004] KERR, A. D.. **Fundamentals of Railway Track Engineering.** Simmons Boardman Books, Universidade de Delaware, EUA, 2004. (document), 2.2, 2.3, 2.4, 2.2.6
- [Telliskivi-2001] T. TELLISKIVI, ULF. OLOFSSON, U. S.; KRUSE, P.. **A tool and a method for fe analysis of wheel and rail interaction.** Stockholm, Sweden, 2001. 2.3
- [Verichev-1998] VERICHEV, S. N.; METRIKINE, A. V.. **Dynamic rigidity of a beam in a moving contact.** volumen 41, p. 1111–1117, 2000. 2.3
- [Vicent-2001] VICENT, G.. **Modal analysis and numerical modeling of a concrete railway sleeper.** 130 f. MastersThesis - Division of

Structural Engineering at Chalmers, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2001. 2.3

[Voss-1987] VOSS, H. A.. **A new justification of finite dynamic element methods.** volumen 83, p. 232–242, 1987. 2.6

[Vostroukhov-2003] VOSTROUKHOV, A. V.; METRIKINE, A. V.. **Periodically supported beam on a visco-elastic layer as a model for dynamic analysis of a high-speed railway track.** p. 572585, 2003. 2.3

[Warburton-1976] WARBURTON, G. B.. **The Dynamical Behaviour of Structures.** Pergamon Press, Oxford, 1976. 2.5

[Wu-2002] WU, T. X.; THOMPSON, D. J.. **Wheel/rail interaction with coupling between vertical and lateral directions.** August 2002. 2.3

[Zhai-1997] ZHAI, W. M.; CAI, Z.. **Dynamic interaction between a lumped mass vehicle and discretely supported continuous rail track.** p. 987–997, 1997. 2.3

[Zhai-2003] ZHAI, W. M.; WANG, K. Y. ; LIN, J. H.. **Modelling and experiment of railwayballast vibrations.** p. 673–683, 2003. (document), 5.6, 5.1, 5.2, 5.3, 5.6

A

Procedimento de transferência de dados entre Maple, Fortran e Matlab

A implementação computacional dos elementos unidimensionais de viga e treliça utilizados na modelagem de uma via férrea foi feita utilizando o software Maple. Para cada elemento, as matrizes de rigidez, massa e amortecimento foram obtidas utilizando-se de um desenvolvimento em série em função de uma frequência circular de vibração ω . Como resultado deste desenvolvimento, chega-se a um problema de autovalor não-linear. O problema é solucionado por um método iterativo de sub-espaço denominando Jacobi-Davidson . Utilizando-se desses conceitos, (Dumont-2006-1) desenvolveu uma rotina em fortran para solução geral de problemas de autovalor não-linear. Entretanto, como as matrizes foram desenvolvidas em Maple, houve a necessidade de criar um procedimento de interação entre Maple e fortran, onde os dados de entrada são fornecidos pelo Maple e os autovalores e autovetores são calculados pela rotina NL_eigen_complex em fortran.

A seguir, é apresentado o procedimento utilizado para obtenção dos autovalores e autovetores, fazendo-se uso da rotina NL_eigen_complex (Dumont-2006-1).

Procedimento para entrada de dados

Entrada de dados

net *Dimensão das matrizes*
nw *Número de matrizes de massa*
nn *Número de linhas da matriz*
num_inter *Número limite de interações*

Gravando as matrizes

- [1] arq1:=‘ K.txt ‘: *Nomeando o arquivo txt*
- [2] fd1:=fopen(arq1,WRITE,TEXT): *Declara a função do arquivo txt*
- [3] fprintf(arq1,‘ %q \n’,‘exemplo com elementos de Ferrovia’): *Gravando o título do arquivo txt*
- [4] fprintf(arq1,‘ %g %g %g \n ‘ , net, nw, num_inter): *Gravando, respectiva-*

mente, a dimensão , o número de matrizes e o limite de interações no arquivo *txt*

[5] *Início do Loop para armazenamento das matrizes*

[5.1] **for** *inw* **from** 0 **to** *nw* **do** *Percorrendo o número de matrizes*

[5.2] **for** *i* **to** *net* **do** *Percorrendo o número de linhas*

[5.3] **for** *j* **to** *net* **do** *Percorrendo o número de colunas*

[5.4] **fprintf**(*arq1*, '%.16E \t ', *Kest_{inw(i,j)}*): *Gravando as matrizes no arquivo arq1.txt*

[5.5] **od**: *Fim do loop [5.1]*

[5.6] **fprintf**(*arq1*, '\n '): *Imprime as matrizes em arq1.txt*

[5.7] **od**: *Fim dos loops [5.2] e [5.3]*

[6] **fclose**(*arq1*): *Fecha o arquivo arq1.txt*

[7] **system**(*NL_ eigen_ complex*): *Chama a rotina em fortran que determina os autovalores e autovetores do problema*

[8] *npal* *Número de palavras no título (exemplo: Teste com elementos de Ferrovia = 5 palavras)*

Procedimento para saída de dados

Lendo Autovalores Reais

[9] *arq:= 'Omega_ phi.txt ':* *Nomeia o arquivo de saída dos autovalores*

[10] *fd:=fopen(arq,READ,TEXT):* *Abre o arquivo de saída dos autovalores*

[11] *titulo:=vector(npal,0):* *Cria um vetor para armazenar o título*

[12] **for** *i* **to** *npal* **do** *Loop para armazenar o título*

[12.1] *titulo_i:=fscanf(fd, '%s ')_[1]:* *Leitura do título*

[12.2] **od**: *Fim do loop [12]*

[12.3] **print**(*titulo*): *Imprime na tela o título*

[13] *nauto:=fscanf(fd, '%d ')_[1]:* *Leitura do número de autovalores*

[14] *n:=fscanf(fd, '%d ')_[1]:* *Leitura do número de matrizes de massa*

[15] *num_iter:=fscanf(fd, '%d ')_[1]:* *Leitura do número limite de interações*

[16] *ω:=vector(nauto, 0):* *Cria um vetor nulo para armazenar os autovalores*

[16.1] **for** *i* **to** *nauto* **do** *Loop para armazenar os autovetores*

[16.2] *ω_i:=fscanf(fd, '%f ')_[1]:* *Leitura dos autovalores*

[16.3] **od**: *Fim do loop [16.1]*

[16.4] **print**(*ω*): *Imprime na tela os autovalores*

[17] *Φ:=matrix(nauto, nn, 0):* *Cria uma matriz nula para armazenar os autovetores*

[17.1] **for** *i* **to** *nauto* **do** *Loop para leitura do número de autovalores*

[17.2] **for** *j* **to** *nn* **do** *Loop para leitura do número de colunas*

- [17.3] $\Phi_{i,j} := \text{fscanf}(\text{fd}, \%f')[1]$; *Leitura dos autovetores*
 [17.4] **od**; *Fim do loop* [17.1]
 [17.5] **od**; *Fim do loop* [17.2]
 [17.6] **print**(Φ); *Imprime na tela os autovetores*
 [18] **fclose**(arq); *Fecha o arquivo arq.txt*

Lendo Autovalores Complexos

- [19] arqc := 'Complex_omega_phi.txt ': *Nomeia o arquivo de saída dos autovalores*
 [20] fc := **fopen**(arqc, READ, TEXT); *Abre o arquivo de saída dos autovalores*
 [21] cauto := **fscanf**(fc, \%d')[1]; *Leitura do número de autovalores*
 [22] n := **fscanf**(fd, \%d')[1]; *Leitura do número de matrizes de massa*
 [23] num.iter := **fscanf**(fd, \%d')[1]; *Leitura do número limite de interações*
 [24] $\omega := \text{vector}(\text{cauto}, 0)$; *Cria um vetor nulo para armazenar os autovalores*
 [24.1] **for** i **to** cauto **do** *Loop para armazenar os autovalores*
 [24.2] $\omega_i := \text{fscanf}(\text{fc}, \%a')[1]$; *Leitura dos autovalores*
 [24.3] **od**; *Fim do loop* [16.1]
 [24.4] **print**(ω); *Imprime na tela os autovalores*
 [25] $\Phi := \text{matrix}(\text{cauto}, nn, 0)$; *Cria uma matriz nula para armazenar os autovetores*
 [25.1] **for** i **to** cauto **do** *Loop para leitura do número de autovalores*
 [25.2] **for** j **to** nn **do** *Loop para leitura do número de colunas*
 [25.3] $\Phi_{i,j} := \text{fscanf}(\text{fd}, \%a')[1]$; *Leitura dos autovetores*
 [25.4] **od**; *Fim do loop* [25.1]
 [25.5] **od**; *Fim do loop* [25.2]
 [25.6] **print**(Φ); *Imprime na tela os autovetores*
 [26] **fclose**(arqc); *Fecha o arquivo arqc.txt*

Colocando os autovalores na forma $a + bi$

- [27] $\Omega := \text{vector}(\text{cauto}, 0)$; *Cria um vetor nulo Ω*
 [27.1] **for** j **to** cauto **do** *Início do Loop*
 [27.2] $\Omega_j := (\omega_j)[1] + (\omega_j)[2] * I$; *Coloca os autovalores na forma $a + bi$*
 [27.3] **od**; *Fim do Loop*
 [27.4] **print**(Ω) *Imprime na tela os autovalores na forma $a+bi$*
 [28] $\phi := \text{matrix}(\text{cauto}, nn, 0)$; *Cria uma matriz nula ϕ*
 [28.1] **for** i **to** cauto **do** *Loop para leitura do número de autovalores*
 [28.2] **for** j **to** nn **do** *Loop para leitura do número de colunas*
 [28.3] $\phi_{i,j} := (\Phi_{i,j})[1] + (\Phi_{i,j})[2] * I$; *Coloca os autovetores na forma $a+bi$*
 [28.4] **od**; *Fim do Loop* [28.1]

[28.5] **od:** *Fim do Loop* [28.2]

[28.6] **print**(ϕ) *Imprime na tela os autovetores na forma $a+bi$*

Exemplo

Considere uma estrutura com 8 graus de liberdade com rigidez, massa e amortecimento conhecidos e geometria definida. Assim pode-se modelar seu comportamento dinâmico tendo em vista a equação, para $n = 2$

$$(K_0 - i\omega C_1 - \omega^2 M_1 - i\omega^3 C_2 - \omega^4 M_2) \phi = 0 \quad (\text{A-1})$$

onde K , M e C são, respectivamente, as matrizes de rigidez, massa e amortecimento e ϕ é uma matriz cujas colunas são os autovetores do problema.

Utilizando a norma de Frobenius, podemos representar a ordem de grandeza das matrizes em série por um número, assim

$$(1,6507 \cdot 10^9 - 1,2045 \cdot 10^5 i\omega - 2,0990 \cdot 10^2 \omega^2 - 1,7331 \cdot 10^{-2} i\omega^3 - 4,9878 \cdot 10^{-5} \omega^4) \phi = 0 \quad (\text{A-2})$$

Fornecendo os dados de entrada no Maple,

$$net := 8, \quad nw := 4, \quad nn := 8, \quad e \quad num_iter := 100 \quad (\text{A-3})$$

a rotina NL_eigen_complex calcula e fornece inicialmente os autovalores (A-4) e autovetores reais

1	$0,1026 \cdot 10^7$	5	$0,9329 \cdot 10^8$
2	$0,1097 \cdot 10^7$	6	$0,1368 \cdot 10^9$
3	$0,1639 \cdot 10^7$	7	$0,3322 \cdot 10^9$
4	$0,3954 \cdot 10^7$	8	$0,1246 \cdot 10^{10}$

(A-4)

e em seguida os autovalores (A-5) e autovetores complexos.

1	(994,0559; -210.3218)	5	(9659,1417; -0.3341)
2	(1027,6393; -223.6788)	6	(11698,6081; -1,0153)
3	(1265,7678; -203.5979)	7	(18226,4981; -0.6475)
4	(1981,5970; -155.0148)	8	(35302,1539; -0.0049)

(A-5)

Por fim, esses autovalores (A-6) e seus correspondentes autovetores são colocados na forma $a + bi$

1	$(994, 0559 - 210, 3218i)$	5	$(9659, 1417 - 0, 3341i)$
2	$(1027, 6393 - 223, 6788i)$	6	$(11698, 6081 - 1, 0153i)$
3	$(1265, 7678 - 203, 5979i)$	7	$(18226, 4981 - 0, 6475i)$
4	$(1981, 5970 - 155, 0148i)$	8	$(35302, 1539 - 0, 0049i)$

(A-6)

Para a plotagem de pontos (x, y) gerados no Maple em Matlab, podemos utilizar o seguinte esquema:

Armazenamento dos pontos gerados no Maple em um arquivo txt

[1] **retart with**(plots): *Reinicializando o Maple e chamando o pacote de plot*

[2] $x := \mathbf{vector}([\mathbf{seq}(f(i), i = 1..np)])$: *Criando um vetor de coordenadas x*

[3] np : *Número de pontos*

[4] **system**(delall): *Limpendo informações anteriores*

[5] $\text{pontos} := \text{'pontos.txt'}$: *Nomeando o arquivo de coordenadas*

[6] $y := \mathbf{vector}(np, 0)$: *Criando um vetor nulo de coordenadas y*

[7] **for** j **to** np **do** *Loop para geração dos pontos*

[7.1] $y_j = f(x_j)$: *Relação entre as coordenadas*

[7.2] **fprintf**(pontos, '%.16E \t', x_j): *Escreve a coordenada x_j em pontos.txt*

[7.3] **fprintf**(pontos, '%.16E \t', y_j): *Escreve a coordenada y_j em pontos.txt*

[7.4] **fprintf**(pontos, '\n'): *Distribui as coordenadas em coluna*

[7.5] **od**: *Fim do Loop*

[7.6] **print**(x, y): *Imprime as coordenadas*

[8] **fclose**(pontos) *Fecha o arquivo pontos.txt*

Leitura dos pontos no Matlab e plotagem do gráfico

[9] **load** pontos.txt *Carrega o arquivo txt de coordenadas*

[10] $x = \text{pontos}(:, 1)$; *Lê a primeira coluna de dados*

[11] $y = \text{pontos}(:, 2)$; *Lê a segunda coluna de dados*

[12] **plot**(x, y); *Gera o gráfico (x_i, y_i) no Matlab*

Como ilustração, são plotados na figura (A.1) os autovalores e seus respectivos conjugados no plano real e imaginário, utilizando os pontos gerados no Maple e plotados no Matlab.

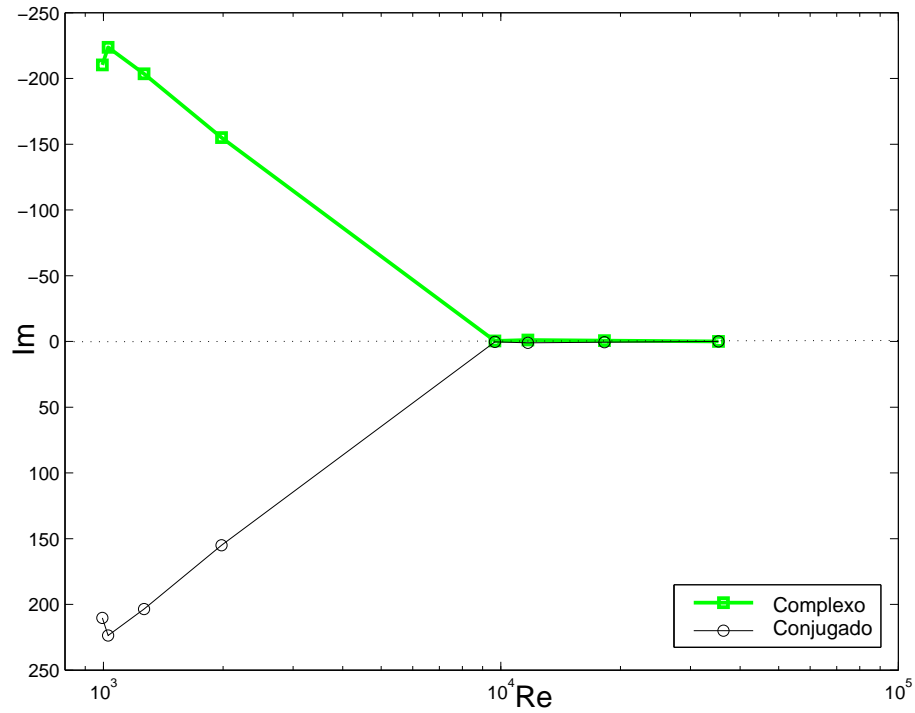


Figura A.1: Distribuição dos autovalores no plano real e imaginário

A justificativa para utilização do Matlab para geração de gráficos está vinculada a qualidade que este programa proporciona, principalmente quando requer-se figuras nos formatos ps e eps, utilizadas em ambiente Latex.