

Estudo das Vibrações Causadas por uma Máquina de Estampagem Implementadas em MATLAB

Orientador: Prof. Diomar Cesar Lobão

Aluno: Aníbal Gabriel Martins Vilela

Universidade Federal Fluminense

30 de março de 2016

1. Introdução

Noções Básicas do Estudo Proposto

Noções Básicas de MATLAB

2. Ferramentas Teóricas

Mecânica Newtoniana

Métodos Numéricos de Runge-Kutta

Implementação em MATLAB

3. Projeto da Fundação de uma Máquina de Estampagem

Problema Proposto

Equipamento utilizado

Parâmetros do Projeto

Força de Estampagem

Força de Embutimento

Forma do Forçamento

Montagem Diretamente ao Chão

Primeira Aproximação: Sistema Não-Amortecido

Segunda Aproximação: Sistema Amortecido
Montagem Sobre uma Fundação em Bloco
Equação de Movimento
Primeira Aproximação: Sistema Não-Amortecido
Segunda Aproximação: Sistema Amortecido
Terceira Aproximação: Mudança da Massa da Fundação
Conclusão

4. Bibliografia

Bibliografia

1. Introdução

1.1. Noções Básicas do Estudo Proposto

Área de estudo: Vibrações Mecânicas

1.1. Noções Básicas do Estudo Proposto

Área de estudo: Vibrações Mecânicas

- ▶ Mecânica Newtoniana

1.1. Noções Básicas do Estudo Proposto

Área de estudo: Vibrações Mecânicas

- ▶ Mecânica Newtoniana
- ▶ Equações Diferenciais

1.1. Noções Básicas do Estudo Proposto

Área de estudo: Vibrações Mecânicas

- ▶ Mecânica Newtoniana
- ▶ Equações Diferenciais
- ▶ Métodos Numéricos

1.1. Noções Básicas do Estudo Proposto

Área de estudo: Vibrações Mecânicas

- ▶ Mecânica Newtoniana
- ▶ Equações Diferenciais
- ▶ Métodos Numéricos
- ▶ Programação

1.1. Noções Básicas do Estudo Proposto

Área de estudo: Vibrações Mecânicas

- ▶ Mecânica Newtoniana
- ▶ Equações Diferenciais
- ▶ Métodos Numéricos
- ▶ Programação
 - ▶ linguagens tradicionais (C, FORTRAN, Python)

1.1. Noções Básicas do Estudo Proposto

Área de estudo: Vibrações Mecânicas

- ▶ Mecânica Newtoniana
- ▶ Equações Diferenciais
- ▶ Métodos Numéricos
- ▶ Programação
 - ▶ linguagens tradicionais (C, FORTRAN, Python)
 - ▶ MATLAB, Octave

1.2. Noções Básicas de MATLAB

- ▶ MATLAB, Scilab e GNU Octave

1.2. Noções Básicas de MATLAB

- ▶ MATLAB, Scilab e GNU Octave
- ▶ Ajuda e documentação:

`help <command>`

1.2. Noções Básicas de MATLAB

- ▶ MATLAB, Scilab e GNU Octave
- ▶ Ajuda e documentação:

```
help <command>
```

- ▶ Instalação de pacotes extras no Octave:

```
pkg install -forge <package-name>  
pkg load/unload <package-name>  
pkg list
```

2. Ferramentas Teóricas

2.1. Mecânica Newtoniana

- Análise de forças atuantes no sistema;

$$\sum_{i=0}^n \underline{F}_i = m \underline{\ddot{x}} \quad (2.1)$$

2.2. Métodos Numéricos de Runge-Kutta

$$y^{n+1} = y^n + \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (2.2)$$

- ▶ $K_1 = \delta t \cdot f(y^n, t^n)$
- ▶ $K_2 = \delta t \cdot f\left(y^n + \frac{1}{2} \cdot K_1, t^n + \frac{\delta t}{2}\right)$
- ▶ $K_3 = \delta t \cdot f\left(y^n + \frac{1}{2} \cdot K_2, t^n + \frac{\delta t}{2}\right)$
- ▶ $K_4 = \delta t \cdot f\left(y^n + K_3, \underbrace{t^n + \delta t}_{t^{n+1}}\right)$

2.2. Métodos Numéricos de Runge-Kutta

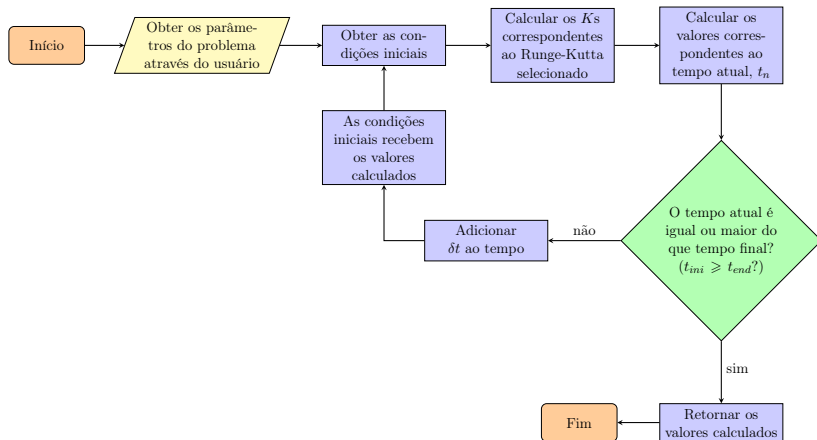


Figura: Fluxograma genérico dos métodos de Runge-Kutta.

2.3. Implementação em MATLAB

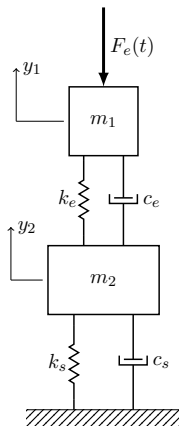


Figura: Diagrama do sistema massa-mola-amortecedor de 2 GdLs.

2.3. Implementação em MATLAB

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + c_e \dot{y}_1 - c_e \dot{y}_2 + k_e y_1 - k_e y_2 = F_e(t) \\ m_2 \ddot{y}_2 - c_e \dot{y}_1 + (c_s + c_e) \dot{y}_2 - k_e y_1 + (k_s + k_e) y_2 = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\begin{cases} u_1 = \underline{y}[1] \\ v_1 = \underline{y}[2] \\ u_2 = \underline{y}[3] \\ v_2 = \underline{y}[4] \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} \dot{u}_1 = \underline{y}[2] \\ \dot{v}_1 = \frac{1}{m_1} (-c_e \underline{y}[2] + c_e \underline{y}[4] - k_e \underline{y}[1] + k_e \underline{y}[3] + F_e) \\ \dot{u}_2 = \underline{y}[4] \\ \dot{v}_2 = \frac{1}{m_2} (c_e \underline{y}[2] - (c_s + c_e) \underline{y}[4] + k_e \underline{y}[1] - (k_s + k_e) \underline{y}[3]) \end{cases} \quad (2.5)$$

$$F_e(t) = F \cdot \cos(\omega t)$$

2.3. Implementação em MATLAB

Algoritmo 1: mov_eq_vec.m

```
1 function mov = mov_eq_vec(t,y)
2     F = 12;
3     omega = 1;
4     F_e = F*cos(omega*t);
5     m_1 = 1.5e1;
6     k_e = 1000;
7     c_e = 150;
8     m_2 = 1.5*m_1;
9     k_s = 5000;
10    c_s = 100;
11
12    mov = [ y(2),
13            1/m_1*(- c_e*y(2) + c_e*y(4) - k_e*y(1) + k_e*y(3) + F_e),
14            y(4),
15            1/m_2*(c_e*y(2) - (c_s + c_e)*y(4) + k_e*y(1) - (k_s + k_e)*y(3)) ];
16 end
```

2.3. Implementação em MATLAB

► Runge Kutta de Quarta Ordem

Algoritmo 2: rk4.m

```
1  clear all; clc; close all;
2
3  dt      = 1e-2;
4  t_ini   = 0;
5  t_end   = 100;
6  y_ini1  = 0;
7  y_ini2  = 0;
8  yp_ini1 = 0;
9  yp_ini2 = 0;
10
11  ti = [t_ini];
12  yi = [y_ini1; y_ini2; yp_ini1; yp_ini2];
13
14  while ti(end) <= t_end
15      tn = ti(end);
16      yn = yi(:,end);
17
18      k_1 = dt .* mov_eq_vec(tn      , yn      );
19      k_2 = dt .* mov_eq_vec(tn .+ dt/2, yn .+ k_1./2 );
20      k_3 = dt .* mov_eq_vec(tn .+ dt/2, yn .+ k_2./2 );
21      k_4 = dt .* mov_eq_vec(tn .+ dt , yn .+ k_3 );
22
```

2.3. Implementação em MATLAB

```
23     yn = yn .+ (k_1 .+ 2.*k_2 .+ 2.*k_3 .+ k_4)./6;  
24  
25     ti = [ti tn+dt];  
26     yi = [yi yn];  
27 end  
28  
29 yi = transpose(yi);  
30  
31 plot(ti, yi(:,1));  
32 xlabel 'Tempo'  
33 ylabel 'Deslocamento da massa m_1'
```

2.3. Implementação em MATLAB

► Felbreg

Algoritmo 3: ode23s.m

```
1  clear all; clc; close all;
2
3  t_ini = 0;
4  t_end = 100;
5  y_ini1 = 0;
6  y_ini2 = 0;
7  yp_ini1 = 0;
8  yp_ini2 = 0;
9
10 [t, ya] = ode23s(@mov_eq_vec, [t_ini t_end], [y_ini1, y_ini2, yp_ini1, yp_ini2]);
11
12 plot(t, ya(:,1));
13 legend('deslocamento da massa m1 [mm]');
14 xlabel('Tempo [s]', 'fontsize', 15)
15 ylabel('Deslocamento [mm]', 'fontsize', 15)
```

3. Projeto da Fundação de uma Máquina de Estampagem

3.1. Problema Proposto

Deseja-se estudar o comportamento da máquina em duas situações:

3.1. Problema Proposto

Deseja-se estudar o comportamento da máquina em duas situações:

1. montagem diretamente ao chão

3.1. Problema Proposto

Deseja-se estudar o comportamento da máquina em duas situações:

1. montagem diretamente ao chão
 - ▶ não requer modificações na estrutura

3.1. Problema Proposto

Deseja-se estudar o comportamento da máquina em duas situações:

1. montagem diretamente ao chão
 - ▶ não requer modificações na estrutura
 - ▶ menor custo

3.1. Problema Proposto

Deseja-se estudar o comportamento da máquina em duas situações:

1. montagem diretamente ao chão
 - ▶ não requer modificações na estrutura
 - ▶ menor custo
 - ▶ menor controle de vibrações e ruído

3.1. Problema Proposto

Deseja-se estudar o comportamento da máquina em duas situações:

1. montagem diretamente ao chão
 - ▶ não requer modificações na estrutura
 - ▶ menor custo
 - ▶ menor controle de vibrações e ruído
 - ▶ pode afetar equipamentos próximos

3.1. Problema Proposto

Deseja-se estudar o comportamento da máquina em duas situações:

1. montagem diretamente ao chão
 - ▶ não requer modificações na estrutura
 - ▶ menor custo
 - ▶ menor controle de vibrações e ruído
 - ▶ pode afetar equipamentos próximos
2. montagem sobre uma fundação

3.1. Problema Proposto

Deseja-se estudar o comportamento da máquina em duas situações:

1. montagem diretamente ao chão
 - ▶ não requer modificações na estrutura
 - ▶ menor custo
 - ▶ menor controle de vibrações e ruído
 - ▶ pode afetar equipamentos próximos
2. montagem sobre uma fundação
 - ▶ requer projeto, instalação e manutenção da fundação

3.1. Problema Proposto

Deseja-se estudar o comportamento da máquina em duas situações:

1. montagem diretamente ao chão
 - ▶ não requer modificações na estrutura
 - ▶ menor custo
 - ▶ menor controle de vibrações e ruído
 - ▶ pode afetar equipamentos próximos
2. montagem sobre uma fundação
 - ▶ requer projeto, instalação e manutenção da fundação
 - ▶ maior custo

3.1. Problema Proposto

Deseja-se estudar o comportamento da máquina em duas situações:

1. montagem diretamente ao chão
 - ▶ não requer modificações na estrutura
 - ▶ menor custo
 - ▶ menor controle de vibrações e ruído
 - ▶ pode afetar equipamentos próximos
2. montagem sobre uma fundação
 - ▶ requer projeto, instalação e manutenção da fundação
 - ▶ maior custo
 - ▶ maior controle de vibrações e ruído

3.1. Problema Proposto

Deseja-se estudar o comportamento da máquina em duas situações:

1. montagem diretamente ao chão
 - ▶ não requer modificações na estrutura
 - ▶ menor custo
 - ▶ menor controle de vibrações e ruído
 - ▶ pode afetar equipamentos próximos
2. montagem sobre uma fundação
 - ▶ requer projeto, instalação e manutenção da fundação
 - ▶ maior custo
 - ▶ maior controle de vibrações e ruído
 - ▶ maior flexibilidade para mudanças no ciclo de operação

3.2. Equipamento utilizado



Figura: Processo de estampagem de uma folha de alumínio para a fabricação de uma porta de carro.
Fonte: Programa How It's Made.

3.2. Equipamento utilizado

Após o estudo de equipamentos industriais com a mesma funcionalidade, determinou-se os seguintes dados:

3.2. Equipamento utilizado

Após o estudo de equipamentos industriais com a mesma funcionalidade, determinou-se os seguintes dados:

- ▶ massa: 15 000 kg

3.2. Equipamento utilizado

Após o estudo de equipamentos industriais com a mesma funcionalidade, determinou-se os seguintes dados:

- ▶ massa: 15 000 kg
- ▶ tempo do ciclo operacional: 2 s ($f = 0.5$ Hz)

3.3. Parâmetros do Projeto

As normas ABNT NBR 10082/1987 e Petrobras N-1848 definem a velocidade efetiva como:

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(\sum_{i=1}^n V_i^2 \right)} \quad (3.1)$$

onde V_i correspondem às medidas de amplitude da velocidade de vibração realizadas em diferentes partes do equipamento. Nos casos estudados, corresponde ao valor máximo observado nos primeiros 100 s das simulações realizadas.

3.3. Parâmetros do Projeto

Tabela: Avaliação da qualidade para diferentes classes de máquina segundo a norma ABNT NBR 10082/1987.

Faixas de severidade de vibração		Exemplos de avaliação de qualidade para classes diferentes de máquinas			
Faixa	Velocidade efetiva (mm/s) nos limites da faixa	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
0.28	0.28	A	A	A	A
0.45	0.45				
0.71	0.71	B	B	B	B
1.12	1.12				
1.8	1.8	C	C	B	B
2.8	2.8				
4.5	4.5				

3.3. Parâmetros do Projeto

Procusa-se dimensionar o sistema para que $v_{ef} \leq 0.28 \text{ mm/s}$, a menor faixa de severidade de vibração classificada pela norma Petrobras N-1848.

3.4. Força de Estampagem

$$F_{emb} = m \cdot F_c \quad (3.2)$$

$$= m \cdot h \cdot p \cdot K_s \quad (3.3)$$

Para calcular a força exigida pelo processo, precisa-se de quatro parâmetros:

3.4. Força de Estampagem

$$F_{emb} = m \cdot F_c \quad (3.2)$$

$$= m \cdot h \cdot p \cdot K_s \quad (3.3)$$

Para calcular a força exigida pelo processo, precisa-se de quatro parâmetros:

- *fator de correção*: $m = 0.93$

3.4. Força de Estampagem

$$F_{emb} = m \cdot F_c \quad (3.2)$$

$$= m \cdot h \cdot p \cdot K_s \quad (3.3)$$

Para calcular a força exigida pelo processo, precisa-se de quatro parâmetros:

- ▶ *fator de correção*: $m = 0.93$
- ▶ *perímetro do corte*: $p = (417 \pm 20) \text{ mm}$

3.4. Força de Estampagem

$$F_{emb} = m \cdot F_c \quad (3.2)$$

$$= m \cdot h \cdot p \cdot K_s \quad (3.3)$$

Para calcular a força exigida pelo processo, precisa-se de quatro parâmetros:

- ▶ *fator de correção*: $m = 0.93$
- ▶ *perímetro do corte*: $p = (417 \pm 20) \text{ mm}$
- ▶ *espessura da chapa*: $h = (1.6 \pm 0.3) \text{ mm}$

3.4. Força de Estampagem

$$F_{emb} = m \cdot F_c \quad (3.2)$$

$$= m \cdot h \cdot p \cdot K_s \quad (3.3)$$

Para calcular a força exigida pelo processo, precisa-se de quatro parâmetros:

- ▶ *fator de correção*: $m = 0.93$
- ▶ *perímetro do corte*: $p = (417 \pm 20) \text{ mm}$
- ▶ *espessura da chapa*: $h = (1.6 \pm 0.3) \text{ mm}$
- ▶ *tensão de ruptura ao cisalhamento*: $K_s = 125 \times 10^3 \text{ MPa}$

3.5. Força de Embutimento

De acordo com os dados obtidos, a força de embutimento pode ser calculada como:

$$F_{emb} = 0.93 \cdot h \cdot p \cdot K_s \quad (3.4)$$

$$= 0.93 \cdot (1.6) \cdot (417) \cdot (125 \cdot 10^3) \quad (3.5)$$

$$= 77\,562 \text{ N} \quad (3.6)$$

$$= 77.562 \cdot 10^3 \text{ N} \quad (3.7)$$

$$= 77.562 \text{ kN} \quad (3.8)$$

3.6. Forma do Forçamento

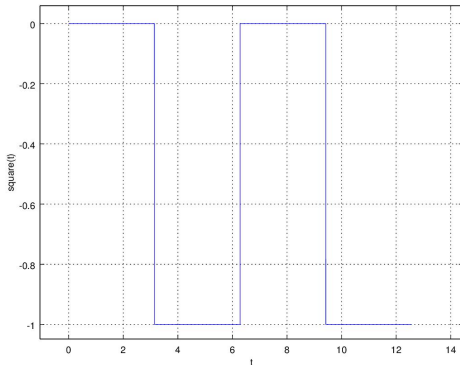


Figura: Forma do Forçamento utilizado.

3.7. Montagem Diretamente ao Chão

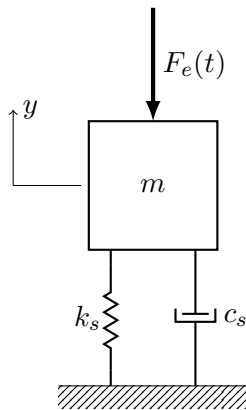


Figura: Diagrama da máquina montada ao chão.

3.7. Montagem Diretamente ao Chão

- ▶ m corresponde à massa do equipamento

3.7. Montagem Diretamente ao Chão

- ▶ m corresponde à massa do equipamento
- ▶ k_s e c_s representam a resposta do solo aos esforços exercidos pelo equipamento

3.7. Montagem Diretamente ao Chão

- ▶ m corresponde à massa do equipamento
- ▶ k_s e c_s representam a resposta do solo aos esforços exercidos pelo equipamento
- ▶ $F_e(t)$ representa o forçamento externo aplicado, no caso, corresponde à força de embutimento, F_{emb}

3.7. Montagem Diretamente ao Chão

$$m\ddot{y} + c_s\dot{y} + k_sy = F_e(t) \quad (3.9)$$

$$\begin{cases} y = u = \underline{y}[1] \\ \dot{y} = \dot{u} = v = \underline{y}[2] \\ \ddot{y} = \ddot{u} = \dot{v} \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\begin{cases} \dot{u} = \underline{y}[2] \\ \dot{v} = \frac{1}{m} (F_e(t) - c_s\underline{y}[2] - k_s\underline{y}[1]) \end{cases} \quad (3.11)$$

3.7. Montagem Diretamente ao Chão

Algoritmo 4: mov_eq_machine_on_floor

```
1 function mov = mov_eq_machine_on_floor(t,y)
2     Fe      = square(2*pi*0.5*t)*77.562; % * 1e3 [N]
3     Fe(Fe>0) = 0;                        % -1 <= square(t) <= 0
4     m       = 1.5e1;                     % * 1e3 [kg]
5     k       = 1000;                       % * 1e3 [N/mm]
6     c       = 150;                       % * 1e3 [N*s/mm]
7
8     mov = [ y(2),
9             1/m*(Fe - c*y(2) - k*y(1)) ];
10 end
```

3.8. Primeira Aproximação: Sistema Não-Amortecido

Tabela: Resultados encontrados para o sistema montado ao chão utilizando a implementação do método de Runge-Kutta de quarta ordem.

Constante da mola (10^3 N/mm)	Velocidade efetiva (mm/s)
1.00(0)	8.05(7)
10.00(0)	3.39(0)
50.00(0)	2.93(9)
300.00(0)	1.31(9)
500.00(0)	0.66(9)
700.00(0)	0.55(0)
1000.00(0)	0.74(0)
3000.00(0)	0.36(7)
6000.00(0)	0.21(3)

3.8. Primeira Aproximação: Sistema Não-Amortecido

Tabela: Resultados encontrados para o sistema montado ao chão utilizando o comando `ode23s`.

Constante da mola (10^3 N/mm)	Velocidade efetiva (mm/s)
1.00(0)	14.26(7)
10.00(0)	3.49(8)
50.00(0)	2.99(6)
300.00(0)	1.39(7)
500.00(0)	0.82(2)
700.00(0)	0.59(1)
1000.00(0)	0.88(8)
3000.00(0)	0.45(2)
6000.00(0)	0.22(2)

3.9. Segunda Aproximação: Sistema Amortecido

Tabela: Resultados encontrados para o sistema montado ao chão ao adicionar-se um fator de amortecimento utilizando a implementação do método de Runge-Kutta de quarta ordem.

Constante de amortecimento (10^3 Ns/mm)	Velocidade efetiva (mm/s)
1.00(0)	0.70(5)
10.00(0)	0.57(4)
100.00(0)	0.26(8)
150.00(0)	0.22(1)

3.9. Segunda Aproximação: Sistema Amortecido

Tabela: Resultados encontrados para o sistema montado ao chão ao adicionar-se um fator de amortecimento utilizando o comando `ode23s`.

Constante de amortecimento (10^3 Ns/mm)	Velocidade efetiva (mm/s)
1.00(0)	0.64(9)
10.00(0)	0.53(0)
100.00(0)	0.26(8)
150.00(0)	0.22(4)

3.10. Montagem Sobre uma Fundação em Bloco

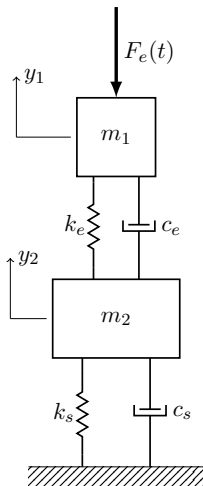


Figura: Diagrama da máquina montada sobre uma fundação.

3.10. Montagem Sobre uma Fundação em Bloco

- ▶ m_1 corresponde à massa do equipamento

3.10. Montagem Sobre uma Fundação em Bloco

- ▶ m_1 corresponde à massa do equipamento
- ▶ m_2 corresponde à massa da fundação

3.10. Montagem Sobre uma Fundação em Bloco

- ▶ m_1 corresponde à massa do equipamento
- ▶ m_2 corresponde à massa da fundação
- ▶ k_e e c_e representam a resposta da fundação aos esforços exercidos pelo equipamento

3.10. Montagem Sobre uma Fundação em Bloco

- ▶ m_1 corresponde à massa do equipamento
- ▶ m_2 corresponde à massa da fundação
- ▶ k_e e c_e representam a resposta da fundação aos esforços exercidos pelo equipamento
- ▶ k_s e c_s representam a resposta do solo aos esforços exercidos pela fundação

3.10. Montagem Sobre uma Fundação em Bloco

- ▶ m_1 corresponde à massa do equipamento
- ▶ m_2 corresponde à massa da fundação
- ▶ k_e e c_e representam a resposta da fundação aos esforços exercidos pelo equipamento
- ▶ k_s e c_s representam a resposta do solo aos esforços exercidos pela fundação
- ▶ $F_e(t)$ representa o forçamento externo aplicado, no caso, corresponde à força de embutimento, F_{emb}

3.11. Equação de Movimento

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 + c_e \dot{y}_1 - c_e \dot{y}_2 + k_e y_1 - k_e y_2 = F_e(t) \\ m_2 \ddot{y}_2 - c_e \dot{y}_1 + (c_s + c_e) \dot{y}_2 - k_e y_1 + (k_s + k_e) y_2 = 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\begin{cases} u_1 = \underline{y}[1] \\ v_1 = \underline{y}[2] \\ u_2 = \underline{y}[3] \\ v_2 = \underline{y}[4] \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\begin{cases} \dot{u}_1 = \underline{y}[2] \\ \dot{v}_1 = \frac{1}{m_1} (-c_e \underline{y}[2] + c_e \underline{y}[4] - k_e \underline{y}[1] + k_e \underline{y}[3] + F_e) \\ \dot{u}_2 = \underline{y}[4] \\ \dot{v}_2 = \frac{1}{m_2} (c_e \underline{y}[2] - (c_s + c_e) \underline{y}[4] + k_e \underline{y}[1] - (k_s + k_e) \underline{y}[3]) \end{cases} \quad (3.14)$$

3.11. Equação de Movimento

Algoritmo 5: ../code/problem/mov_eq_machine_on_block.m

```
1 function mov = mov_eq_machine_on_block(t,y)
2   F_e = square(2*pi*0.5*t)*77.562; % * 1e3 [N]
3   F_e(F_e>0) = 0; % -1 <= square(t) <= 0
4   % machine
5   m_1 = 1.5e1; % * 1e3 [kg]
6   k_e = 1000; % * 1e3 [N/mm]
7   c_e = 150; % * 1e3 [N*s/mm]
8   % block
9   m_2 = 1.5*m_1;
10  k_s = 5000; % * 1e3 [N/mm]
11  c_s = 100; % * 1e3 [N*s/mm]
12
13  mov = [ y(2),
14          1/m_1*(- c_e*y(2) + c_e*y(4) - k_e*y(1) + k_e*y(3) + F_e),
15          y(4),
16          1/m_2*(c_e*y(2) - (c_s + c_e)*y(4) + k_e*y(1) - (k_s + k_e)*y(3)) ];
17 end
```

3.12. Primeira Aproximação: Sistema Não-Amortecido

Tabela: Resultados encontrados para o sistema montado sobre uma fundação em bloco utilizando a implementação do método de Runge-Kutta de quarta ordem.

Constante da mola (10^3 N/mm)	Velocidade efetiva (mm/s)
1.00(0)	5.48(8)
10.00(0)	2.12(4)
100.00(0)	1.49(3)
1000.00(0)	0.45(0)
2000.00(0)	0.36(8)
5000.00(0)	0.30(5)
6000.00(0)	0.29(5)
7000.00(0)	0.28(7)
9000.00(0)	0.27(5)

3.12. Primeira Aproximação: Sistema Não-Amortecido

Tabela: Resultados encontrados para o sistema montado sobre uma fundação em bloco utilizando o comando `ode23s`.

Constante da mola (10^3 N/mm)	Velocidade efetiva (mm/s)
1.00(0)	7.28(9)
10.00(0)	2.41(6)
100.00(0)	1.46(7)
1000.00(0)	0.47(4)
2000.00(0)	0.36(7)
5000.00(0)	0.30(6)
7000.00(0)	0.29(0)
9000.00(0)	0.27(6)

3.13. Segunda Aproximação: Sistema Amortecido

Tabela: Resultados encontrados para o sistema montado sobre uma fundação em bloco ao adicionar-se um fator de amortecimento utilizando a implementação do método de Runge-Kutta de quarta ordem.

Constante de amortecimento c_s (10^3 Ns/mm)	Velocidade efetiva (mm/s)
1.00(0)	0.30(5)
10.00(0)	0.30(3)
100.00(0)	0.28(9)
300.00(0)	0.27(0)
500.00(0)	0.26(0)
1000.00(0)	0.24(6)

3.13. Segunda Aproximação: Sistema Amortecido

Tabela: Resultados encontrados para o sistema montado sobre uma fundação em bloco ao adicionar-se um fator de amortecimento utilizando o comando `ode23s`.

Constante de amortecimento c_s (10^3 Ns/mm)	Velocidade efetiva (mm/s)
1.00(0)	0.30(6)
10.00(0)	0.30(5)
100.00(0)	0.28(9)
300.00(0)	0.27(1)
500.00(0)	0.28(8)
1000.00(0)	0.27(7)

3.14. Terceira Aproximação: Mudança da Massa da Fundação

Tabela: Resultados encontrados para o sistema montado sobre uma fundação em bloco ao alterar-se a relação entre as massas utilizando a implementação do método de Runge-Kutta de quarta ordem

Relação entre a massa da máquina e a da fundação (m_2/m_1)	Velocidade efetiva (mm/s)
1.50(0)	0.28(2)
2.00(0)	0.27(5)
3.00(0)	0.26(3)
5.00(0)	0.24(8)

3.14. Terceira Aproximação: Mudança da Massa da Fundação

Tabela: Resultados encontrados para o sistema montado sobre uma fundação em bloco ao alterar-se a relação entre as massas utilizando o comando `ode23s`

Relação entre a massa da máquina e a da fundação (m_2/m_1)	Velocidade efetiva (mm/s)
1.50(0)	0.28(2)
2.00(0)	0.27(5)
3.00(0)	0.26(1)
5.00(0)	0.24(8)

3.15. Conclusão

Solução proposta

- ▶ Sistema montado diretamente ao chão:
 - ▶ $k_s = 1000 \times 10^3 \text{ N/mm}$
 - ▶ $c_s = 150 \times 10^3 \text{ Ns/mm}$
- ▶ Sistema montado sobre uma fundação:
 - ▶ $k_e = 1000 \times 10^3 \text{ N/mm}$
 - ▶ $c_e = 150 \times 10^3 \text{ Ns/mm}$
 - ▶ $k_s = 5000 \times 10^3 \text{ N/mm}$
 - ▶ $c_s = 100 \times 10^3 \text{ Ns/mm}$
 - ▶ $m_2/m_1 = 2(m_s = 30\,000 \text{ kg})$

4. Bibliografia

4.1. Bibliografia

- [1] Leonard MEIROVITCH. *Elements Of Vibration Analysis*. Inglês. 2ª ed. McGraw-Hill, 1986.
- [2] Arthur Palmeira Ripper NETO. *Vibrações Mecânicas*. Português. E-papers, 2007. ISBN: 978-85-7650-106-0.
- [3] Suresh ARYA, Michael O'NEILL e George PINCUS. *Design of Structures and Foundations for Vibrating Machines*. Inglês. Gulf Publishing Company, maio de 1984. ISBN: 087-201-294-8.
- [4] K. G. BHATIA. *Foundations for Industrial Machines*. Inglês. 1ª ed. D-CAD Publishers, 2008. ISBN: 978-81-9060-320-1.
- [5] Rao V. DUKKIPATI. *MATLAB: An Introduction With Applications*. Inglês. New Age International Publishers, 2010.

4.1. Bibliografia

- [6] John W. EATON et al. *GNU Octave Version 3.8.1 Manual: a High-Level Interactive Language for Numerical Computations*. Inglês. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014. ISBN: 144-141-300-6. URL: <http://www.gnu.org/software/octave/doc/interpreter>.