

# Modelagem Simplificada de Choques Mecânicos em Satélite Durante a Separação do Veículo Lançador

Alex Thaumaturgo Dias  
Aluno da Universidade de Taubaté - Bolsista PIBIC-CNPq/INPE

Orientadores: Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes  
Dr. Mário César Ricci  
Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

Durante o lançamento do satélite brasileiro de coleta de dados SCD-1 ocorreu um fenômeno que permanece ainda sem explicação. Os registros do veículo lançador Pegasus acusam uma taxa de rotação precisa de 120rpm no momento da separação. Ora, em tal circunstância o magnetômetro de bordo do satélite deveria acusar uma leitura praticamente constante visto que a frequência de amostragem deste sensor é 2Hz. Entretanto, desde a primeira passagem sobre a estação de Alcântara, há apenas alguns minutos após a separação, os dados de leitura do magnetômetro já apresentavam uma nítida oscilação numa frequência correspondente a 118.2rpm.

Uma das possíveis causas do fenômeno seria a ocorrência de colisão acidental durante a delicada fase de separação entre o satélite e a coifa de seu veículo lançador. Nesta etapa ambos, satélite e foguete encontram-se rotacionados, de modo que qualquer desbalanceamento na ação dos dispositivos de separação induz movimentos de nutação que podem levar eventualmente a uma colisão.

O propósito deste trabalho é justamente fornecer ferramentas que contribuam para verificar de forma objetiva a ocorrência deste tipo de colisão por meio da previsão do movimento de atitude do satélite posteriormente ao choque. Num primeiro momento o estudo se concentrou na caracterização e classificação dos choques mecânicos no plano. Foram consideradas a lei de Newton para choques mecânicos e a hipótese de Poisson. Os resultados até aqui obtidos são apresentados na forma de mapas em função do coeficiente de atrito entre os materiais e do coeficiente de restituição do choque. Numa Segunda fase pretende-se estender a análise para o caso tri-dimensional, e finalmente aplicar os resultados ao caso satélite-foguete. Ensaios experimentais são também vislumbrados.

## **Bibliografia**

1. Wang, Y. and Mason, M.T. "Two-Dimensional Rigid Body Collisions With Friction" *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 59, pp. 635-642, Sept. 1992.
2. Fonseca, I. M. "Dinâmica da Separação entre o Último Estágio do Veículo Lançador e do Satélite." *Anais, IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, pgs. 915-917. Florianópolis, SC, Dezembro de 1988.
3. Fonseca, I. M. "A Preliminary Study of Separation Dynamics of the First Brazilian Satellite From Its Launch Vehicle." [A-ETD-0038] INPE, São José dos Campos, SP, abril de 1988.
4. Fonseca, I. M. "Dynamic Analysis of the Last Stage-Spacecraft Separation With Initial Condition Set By The Stabilization Mechanism Of The Launcher." [A-ETD-0041] INPE, São José dos Campos, SP.

# Modelagem Simplificada de Choques Mecânicos em Satélite Durante a Separação do Veículo Lançador

Alex Thaumaturgo Dias  
Aluno da Universidade de Taubaté - Bolsista PIBIC-CNPq/INPE

Orientadores: Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes  
Dr. Mário César Ricci  
Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

Durante o lançamento do satélite brasileiro de coleta de dados SCD-1 ocorreu um fenômeno que permanece ainda sem explicação. Os registros do veículo lançador Pegasus acusam uma taxa de rotação precisa de 120rpm no momento da separação. Ora, em tal circunstância o magnetômetro de bordo do satélite deveria acusar uma leitura praticamente constante visto que a frequência de amostragem deste sensor é 2Hz. Entretanto, desde a primeira passagem sobre a estação de Alcântara, há apenas alguns minutos após a separação, os dados de leitura do magnetômetro já apresentavam uma nítida oscilação numa frequência correspondente a 118.2rpm.

Uma das possíveis causas do fenômeno seria a ocorrência de colisão acidental durante a delicada fase de separação entre o satélite e a coifa de seu veículo lançador. Nesta etapa ambos, satélite e foguete encontram-se rotacionados, de modo que qualquer desbalanceamento na ação dos dispositivos de separação induz movimentos de nutação que podem levar eventualmente a uma colisão.

O propósito deste trabalho é justamente fornecer ferramentas que contribuam para verificar de forma objetiva a ocorrência deste tipo de colisão por meio da previsão do movimento de atitude do satélite posteriormente ao choque. Num primeiro momento o estudo se concentrou na caracterização e classificação dos choques mecânicos no plano. Foram consideradas a lei de Newton para choques mecânicos e a hipótese de Poisson. Os resultados até aqui obtidos são apresentados na forma de mapas em função do coeficiente de atrito entre os materiais e do coeficiente de restituição do choque. Numa Segunda fase pretende-se estender a análise para o caso tri-dimensional, e finalmente aplicar os resultados ao caso satélite-foguete. Ensaios experimentais são também vislumbrados.

## **Bibliografia**

1. Wang, Y. and Mason, M.T. "Two-Dimensional Rigid Body Collisions With Friction" *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 59, pp. 635-642, Sept. 1992.
2. Fonseca, I. M. "Dinâmica da Separação entre o Último Estágio do Veículo Lançador e do Satélite." *Anais, IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, pgs. 915-917. Florianópolis, SC, Dezembro de 1988.
3. Fonseca, I. M. "A Preliminary Study of Separation Dynamics of the First Brazilian Satellite From Its Launch Vehicle." [A-ETD-0038] INPE, São José dos Campos, SP, abril de 1988.
4. Fonseca, I. M. "Dynamic Analysis of the Last Stage-Spacecraft Separation With Initial Condition Set By The Stabilization Mechanism Of The Launcher." [A-ETD-0041] INPE, São José dos Campos, SP.

# Modelagem Simplificada de Choques Mecânicos em Satélite Durante a Separação do Veículo Lançador

Alex Thaumaturgo Dias  
Aluno da Universidade de Taubaté - Bolsista PIBIC-CNPq/INPE

Orientadores: Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes  
Dr. Mário César Ricci  
Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

Durante o lançamento do satélite brasileiro de coleta de dados SCD-1 ocorreu um fenômeno que permanece ainda sem explicação. Os registros do veículo lançador Pegasus acusam uma taxa de rotação precisa de 120rpm no momento da separação. Ora, em tal circunstância o magnetômetro de bordo do satélite deveria acusar uma leitura praticamente constante visto que a frequência de amostragem deste sensor é 2Hz. Entretanto, desde a primeira passagem sobre a estação de Alcântara, há apenas alguns minutos após a separação, os dados de leitura do magnetômetro já apresentavam uma nítida oscilação numa frequência correspondente a 118.2rpm.

Uma das possíveis causas do fenômeno seria a ocorrência de colisão acidental durante a delicada fase de separação entre o satélite e a coifa de seu veículo lançador. Nesta etapa ambos, satélite e foguete encontram-se rotacionados, de modo que qualquer desbalanceamento na ação dos dispositivos de separação induz movimentos de nutação que podem levar eventualmente a uma colisão.

O propósito deste trabalho é justamente fornecer ferramentas que contribuam para verificar de forma objetiva a ocorrência deste tipo de colisão por meio da previsão do movimento de atitude do satélite posteriormente ao choque. Num primeiro momento o estudo se concentrou na caracterização e classificação dos choques mecânicos no plano. Foram consideradas a lei de Newton para choques mecânicos e a hipótese de Poisson. Os resultados até aqui obtidos são apresentados na forma de mapas em função do coeficiente de atrito entre os materiais e do coeficiente de restituição do choque. Numa Segunda fase pretende-se estender a análise para o caso tri-dimensional, e finalmente aplicar os resultados ao caso satélite-foguete. Ensaios experimentais são também vislumbrados.

## **Bibliografia**

1. Wang, Y. and Mason, M.T. "Two-Dimensional Rigid Body Collisions With Friction" *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 59, pp. 635-642, Sept. 1992.
2. Fonseca, I. M. "Dinâmica da Separação entre o Último Estágio do Veículo Lançador e do Satélite." *Anais, IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, pgs. 915-917. Florianópolis, SC, Dezembro de 1988.
3. Fonseca, I. M. "A Preliminary Study of Separation Dynamics of the First Brazilian Satellite From Its Launch Vehicle." [A-ETD-0038] INPE, São José dos Campos, SP, abril de 1988.
4. Fonseca, I. M. "Dynamic Analysis of the Last Stage-Spacecraft Separation With Initial Condition Set By The Stabilization Mechanism Of The Launcher." [A-ETD-0041] INPE, São José dos Campos, SP.

# Modelagem Simplificada de Choques Mecânicos em Satélite Durante a Separação do Veículo Lançador

Alex Thaumaturgo Dias  
Aluno da Universidade de Taubaté - Bolsista PIBIC-CNPq/INPE

Orientadores: Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes  
Dr. Mário César Ricci  
Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

Durante o lançamento do satélite brasileiro de coleta de dados SCD-1 ocorreu um fenômeno que permanece ainda sem explicação. Os registros do veículo lançador Pegasus acusam uma taxa de rotação precisa de 120rpm no momento da separação. Ora, em tal circunstância o magnetômetro de bordo do satélite deveria acusar uma leitura praticamente constante visto que a frequência de amostragem deste sensor é 2Hz. Entretanto, desde a primeira passagem sobre a estação de Alcântara, há apenas alguns minutos após a separação, os dados de leitura do magnetômetro já apresentavam uma nítida oscilação numa frequência correspondente a 118.2rpm.

Uma das possíveis causas do fenômeno seria a ocorrência de colisão acidental durante a delicada fase de separação entre o satélite e a coifa de seu veículo lançador. Nesta etapa ambos, satélite e foguete encontram-se rotacionados, de modo que qualquer desbalanceamento na ação dos dispositivos de separação induz movimentos de nutação que podem levar eventualmente a uma colisão.

O propósito deste trabalho é justamente fornecer ferramentas que contribuam para verificar de forma objetiva a ocorrência deste tipo de colisão por meio da previsão do movimento de atitude do satélite posteriormente ao choque. Num primeiro momento o estudo se concentrou na caracterização e classificação dos choques mecânicos no plano. Foram consideradas a lei de Newton para choques mecânicos e a hipótese de Poisson. Os resultados até aqui obtidos são apresentados na forma de mapas em função do coeficiente de atrito entre os materiais e do coeficiente de restituição do choque. Numa Segunda fase pretende-se estender a análise para o caso tri-dimensional, e finalmente aplicar os resultados ao caso satélite-foguete. Ensaio experimentais são também vislumbrados.

## **Bibliografia**

1. Wang, Y. and Mason, M.T. "Two-Dimensional Rigid Body Collisions With Friction" *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 59, pp. 635-642, Sept. 1992.
2. Fonseca, I. M. "Dinâmica da Separação entre o Último Estágio do Veículo Lançador e do Satélite." *Anais, IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, pgs. 915-917. Florianópolis, SC, Dezembro de 1988.
3. Fonseca, I. M. "A Preliminary Study of Separation Dynamics of the First Brazilian Satellite From Its Launch Vehicle." [A-ETD-0038] INPE, São José dos Campos, SP, abril de 1988.
4. Fonseca, I. M. "Dynamic Analysis of the Last Stage-Spacecraft Separation With Initial Condition Set By The Stabilization Mechanism Of The Launcher." [A-ETD-0041] INPE, São José dos Campos, SP.

# Modelagem Simplificada de Choques Mecânicos em Satélite Durante a Separação do Veículo Lançador

Alex Thaumaturgo Dias  
Aluno da Universidade de Taubaté - Bolsista PIBIC-CNPq/INPE

Orientadores: Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes  
Dr. Mário César Ricci  
Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

Durante o lançamento do satélite brasileiro de coleta de dados SCD-1 ocorreu um fenômeno que permanece ainda sem explicação. Os registros do veículo lançador Pegasus acusam uma taxa de rotação precisa de 120rpm no momento da separação. Ora, em tal circunstância o magnetômetro de bordo do satélite deveria acusar uma leitura praticamente constante visto que a frequência de amostragem deste sensor é 2Hz. Entretanto, desde a primeira passagem sobre a estação de Alcântara, há apenas alguns minutos após a separação, os dados de leitura do magnetômetro já apresentavam uma nítida oscilação numa frequência correspondente a 118.2rpm.

Uma das possíveis causas do fenômeno seria a ocorrência de colisão acidental durante a delicada fase de separação entre o satélite e a coifa de seu veículo lançador. Nesta etapa ambos, satélite e foguete encontram-se rotacionados, de modo que qualquer desbalanceamento na ação dos dispositivos de separação induz movimentos de nutação que podem levar eventualmente a uma colisão.

O propósito deste trabalho é justamente fornecer ferramentas que contribuam para verificar de forma objetiva a ocorrência deste tipo de colisão por meio da previsão do movimento de atitude do satélite posteriormente ao choque. Num primeiro momento o estudo se concentrou na caracterização e classificação dos choques mecânicos no plano. Foram consideradas a lei de Newton para choques mecânicos e a hipótese de Poisson. Os resultados até aqui obtidos são apresentados na forma de mapas em função do coeficiente de atrito entre os materiais e do coeficiente de restituição do choque. Numa Segunda fase pretende-se estender a análise para o caso tri-dimensional, e finalmente aplicar os resultados ao caso satélite-foguete. Ensaios experimentais são também vislumbrados.

## **Bibliografia**

1. Wang, Y. and Mason, M.T. "Two-Dimensional Rigid Body Collisions With Friction" *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 59, pp. 635-642, Sept. 1992.
2. Fonseca, I. M. "Dinâmica da Separação entre o Último Estágio do Veículo Lançador e do Satélite." *Anais, IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, pgs. 915-917. Florianópolis, SC, Dezembro de 1988.
3. Fonseca, I. M. "A Preliminary Study of Separation Dynamics of the First Brazilian Satellite From Its Launch Vehicle." [A-ETD-0038] INPE, São José dos Campos, SP, abril de 1988.
4. Fonseca, I. M. "Dynamic Analysis of the Last Stage-Spacecraft Separation With Initial Condition Set By The Stabilization Mechanism Of The Launcher." [A-ETD-0041] INPE, São José dos Campos, SP.

# Modelagem Simplificada de Choques Mecânicos em Satélite Durante a Separação do Veículo Lançador

Alex Thaumaturgo Dias  
Aluno da Universidade de Taubaté - Bolsista PIBIC-CNPq/INPE

Orientadores: Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes  
Dr. Mário César Ricci  
Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

Durante o lançamento do satélite brasileiro de coleta de dados SCD-1 ocorreu um fenômeno que permanece ainda sem explicação. Os registros do veículo lançador Pegasus acusam uma taxa de rotação precisa de 120rpm no momento da separação. Ora, em tal circunstância o magnetômetro de bordo do satélite deveria acusar uma leitura praticamente constante visto que a frequência de amostragem deste sensor é 2Hz. Entretanto, desde a primeira passagem sobre a estação de Alcântara, há apenas alguns minutos após a separação, os dados de leitura do magnetômetro já apresentavam uma nítida oscilação numa frequência correspondente a 118.2rpm.

Uma das possíveis causas do fenômeno seria a ocorrência de colisão acidental durante a delicada fase de separação entre o satélite e a coifa de seu veículo lançador. Nesta etapa ambos, satélite e foguete encontram-se rotacionados, de modo que qualquer desbalanceamento na ação dos dispositivos de separação induz movimentos de nutação que podem levar eventualmente a uma colisão.

O propósito deste trabalho é justamente fornecer ferramentas que contribuam para verificar de forma objetiva a ocorrência deste tipo de colisão por meio da previsão do movimento de atitude do satélite posteriormente ao choque. Num primeiro momento o estudo se concentrou na caracterização e classificação dos choques mecânicos no plano. Foram consideradas a lei de Newton para choques mecânicos e a hipótese de Poisson. Os resultados até aqui obtidos são apresentados na forma de mapas em função do coeficiente de atrito entre os materiais e do coeficiente de restituição do choque. Numa Segunda fase pretende-se estender a análise para o caso tri-dimensional, e finalmente aplicar os resultados ao caso satélite-foguete. Ensaio experimentais são também vislumbrados.

## **Bibliografia**

1. Wang, Y. and Mason, M.T. "Two-Dimensional Rigid Body Collisions With Friction" *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 59, pp. 635-642, Sept. 1992.
2. Fonseca, I. M. "Dinâmica da Separação entre o Último Estágio do Veículo Lançador e do Satélite." *Anais, IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, pgs. 915-917. Florianópolis, SC, Dezembro de 1988.
3. Fonseca, I. M. "A Preliminary Study of Separation Dynamics of the First Brazilian Satellite From Its Launch Vehicle." [A-ETD-0038] INPE, São José dos Campos, SP, abril de 1988.
4. Fonseca, I. M. "Dynamic Analysis of the Last Stage-Spacecraft Separation With Initial Condition Set By The Stabilization Mechanism Of The Launcher." [A-ETD-0041] INPE, São José dos Campos, SP.

# Modelagem Simplificada de Choques Mecânicos em Satélite Durante a Separação do Veículo Lançador

Alex Thaumaturgo Dias  
Aluno da Universidade de Taubaté - Bolsista PIBIC-CNPq/INPE

Orientadores: Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes  
Dr. Mário César Ricci  
Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

Durante o lançamento do satélite brasileiro de coleta de dados SCD-1 ocorreu um fenômeno que permanece ainda sem explicação. Os registros do veículo lançador Pegasus acusam uma taxa de rotação precisa de 120rpm no momento da separação. Ora, em tal circunstância o magnetômetro de bordo do satélite deveria acusar uma leitura praticamente constante visto que a frequência de amostragem deste sensor é 2Hz. Entretanto, desde a primeira passagem sobre a estação de Alcântara, há apenas alguns minutos após a separação, os dados de leitura do magnetômetro já apresentavam uma nítida oscilação numa frequência correspondente a 118.2rpm.

Uma das possíveis causas do fenômeno seria a ocorrência de colisão acidental durante a delicada fase de separação entre o satélite e a coifa de seu veículo lançador. Nesta etapa ambos, satélite e foguete encontram-se rotacionados, de modo que qualquer desbalanceamento na ação dos dispositivos de separação induz movimentos de nutação que podem levar eventualmente a uma colisão.

O propósito deste trabalho é justamente fornecer ferramentas que contribuam para verificar de forma objetiva a ocorrência deste tipo de colisão por meio da previsão do movimento de atitude do satélite posteriormente ao choque. Num primeiro momento o estudo se concentrou na caracterização e classificação dos choques mecânicos no plano. Foram consideradas a lei de Newton para choques mecânicos e a hipótese de Poisson. Os resultados até aqui obtidos são apresentados na forma de mapas em função do coeficiente de atrito entre os materiais e do coeficiente de restituição do choque. Numa Segunda fase pretende-se estender a análise para o caso tri-dimensional, e finalmente aplicar os resultados ao caso satélite-foguete. Ensaios experimentais são também vislumbrados.

## **Bibliografia**

1. Wang, Y. and Mason, M.T. "Two-Dimensional Rigid Body Collisions With Friction" *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 59, pp. 635-642, Sept. 1992.
2. Fonseca, I. M. "Dinâmica da Separação entre o Último Estágio do Veículo Lançador e do Satélite." *Anais, IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, pgs. 915-917. Florianópolis, SC, Dezembro de 1988.
3. Fonseca, I. M. "A Preliminary Study of Separation Dynamics of the First Brazilian Satellite From Its Launch Vehicle." [A-ETD-0038] INPE, São José dos Campos, SP, abril de 1988.
4. Fonseca, I. M. "Dynamic Analysis of the Last Stage-Spacecraft Separation With Initial Condition Set By The Stabilization Mechanism Of The Launcher." [A-ETD-0041] INPE, São José dos Campos, SP.

# Modelagem Simplificada de Choques Mecânicos em Satélite Durante a Separação do Veículo Lançador

Alex Thaumaturgo Dias  
Aluno da Universidade de Taubaté - Bolsista PIBIC-CNPq/INPE

Orientadores: Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes  
Dr. Mário César Ricci  
Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

Durante o lançamento do satélite brasileiro de coleta de dados SCD-1 ocorreu um fenômeno que permanece ainda sem explicação. Os registros do veículo lançador Pegasus acusam uma taxa de rotação precisa de 120rpm no momento da separação. Ora, em tal circunstância o magnetômetro de bordo do satélite deveria acusar uma leitura praticamente constante visto que a frequência de amostragem deste sensor é 2Hz. Entretanto, desde a primeira passagem sobre a estação de Alcântara, há apenas alguns minutos após a separação, os dados de leitura do magnetômetro já apresentavam uma nítida oscilação numa frequência correspondente a 118.2rpm.

Uma das possíveis causas do fenômeno seria a ocorrência de colisão acidental durante a delicada fase de separação entre o satélite e a coifa de seu veículo lançador. Nesta etapa ambos, satélite e foguete encontram-se rotacionados, de modo que qualquer desbalanceamento na ação dos dispositivos de separação induz movimentos de nutação que podem levar eventualmente a uma colisão.

O propósito deste trabalho é justamente fornecer ferramentas que contribuam para verificar de forma objetiva a ocorrência deste tipo de colisão por meio da previsão do movimento de atitude do satélite posteriormente ao choque. Num primeiro momento o estudo se concentrou na caracterização e classificação dos choques mecânicos no plano. Foram consideradas a lei de Newton para choques mecânicos e a hipótese de Poisson. Os resultados até aqui obtidos são apresentados na forma de mapas em função do coeficiente de atrito entre os materiais e do coeficiente de restituição do choque. Numa Segunda fase pretende-se estender a análise para o caso tri-dimensional, e finalmente aplicar os resultados ao caso satélite-foguete. Ensaios experimentais são também vislumbrados.

## **Bibliografia**

1. Wang, Y. and Mason, M.T. "Two-Dimensional Rigid Body Collisions With Friction" *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 59, pp. 635-642, Sept. 1992.
2. Fonseca, I. M. "Dinâmica da Separação entre o Último Estágio do Veículo Lançador e do Satélite." *Anais, IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, pgs. 915-917. Florianópolis, SC, Dezembro de 1988.
3. Fonseca, I. M. "A Preliminary Study of Separation Dynamics of the First Brazilian Satellite From Its Launch Vehicle." [A-ETD-0038] INPE, São José dos Campos, SP, abril de 1988.
4. Fonseca, I. M. "Dynamic Analysis of the Last Stage-Spacecraft Separation With Initial Condition Set By The Stabilization Mechanism Of The Launcher." [A-ETD-0041] INPE, São José dos Campos, SP.

# Modelagem Simplificada de Choques Mecânicos em Satélite Durante a Separação do Veículo Lançador

Alex Thaumaturgo Dias  
Aluno da Universidade de Taubaté - Bolsista PIBIC-CNPq/INPE

Orientadores: Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes  
Dr. Mário César Ricci  
Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

Durante o lançamento do satélite brasileiro de coleta de dados SCD-1 ocorreu um fenômeno que permanece ainda sem explicação. Os registros do veículo lançador Pegasus acusam uma taxa de rotação precisa de 120rpm no momento da separação. Ora, em tal circunstância o magnetômetro de bordo do satélite deveria acusar uma leitura praticamente constante visto que a frequência de amostragem deste sensor é 2Hz. Entretanto, desde a primeira passagem sobre a estação de Alcântara, há apenas alguns minutos após a separação, os dados de leitura do magnetômetro já apresentavam uma nítida oscilação numa frequência correspondente a 118.2rpm.

Uma das possíveis causas do fenômeno seria a ocorrência de colisão acidental durante a delicada fase de separação entre o satélite e a coifa de seu veículo lançador. Nesta etapa ambos, satélite e foguete encontram-se rotacionados, de modo que qualquer desbalanceamento na ação dos dispositivos de separação induz movimentos de nutação que podem levar eventualmente a uma colisão.

O propósito deste trabalho é justamente fornecer ferramentas que contribuam para verificar de forma objetiva a ocorrência deste tipo de colisão por meio da previsão do movimento de atitude do satélite posteriormente ao choque. Num primeiro momento o estudo se concentrou na caracterização e classificação dos choques mecânicos no plano. Foram consideradas a lei de Newton para choques mecânicos e a hipótese de Poisson. Os resultados até aqui obtidos são apresentados na forma de mapas em função do coeficiente de atrito entre os materiais e do coeficiente de restituição do choque. Numa Segunda fase pretende-se estender a análise para o caso tri-dimensional, e finalmente aplicar os resultados ao caso satélite-foguete. Ensaio experimentais são também vislumbrados.

## **Bibliografia**

1. Wang, Y. and Mason, M.T. "Two-Dimensional Rigid Body Collisions With Friction" *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 59, pp. 635-642, Sept. 1992.
2. Fonseca, I. M. "Dinâmica da Separação entre o Último Estágio do Veículo Lançador e do Satélite." *Anais, IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, pgs. 915-917. Florianópolis, SC, Dezembro de 1988.
3. Fonseca, I. M. "A Preliminary Study of Separation Dynamics of the First Brazilian Satellite From Its Launch Vehicle." [A-ETD-0038] INPE, São José dos Campos, SP, abril de 1988.
4. Fonseca, I. M. "Dynamic Analysis of the Last Stage-Spacecraft Separation With Initial Condition Set By The Stabilization Mechanism Of The Launcher." [A-ETD-0041] INPE, São José dos Campos, SP.

## Capítulo 2

### Modelo da Colisão

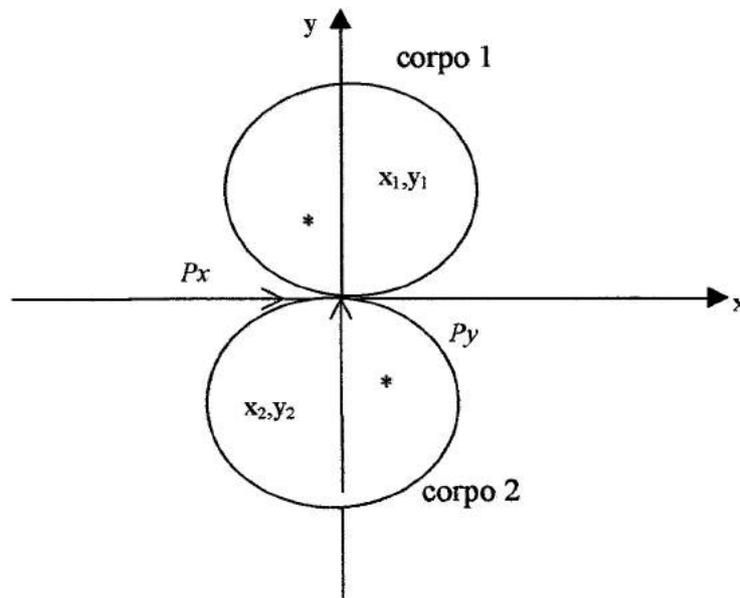
O estudo de choque entre dois corpos rígidos é muito complexo. A principal característica de um choque é que ele ocorre num intervalo de tempo muito curto, durante o qual os dois corpos exercem, um sobre o outro, forças relativamente grandes. Os corpos também se deformam durante o choque e os atritos interfaciais causam perda de energia, há também transformação de energia em energia sonora.

Toda esta complexidade do fenômeno “choque” faz com que análise matemática fique também mais difícil .

Durante o choque há uma deformação que consiste em dois períodos, o primeiro chamado período de compressão e o segundo período de restituição.

O período de compressão estende do instante que inicia o contato entre os corpos até a máxima compressão, quando a velocidade de compressão é zero.

O período de restituição começa na máxima compressão e vai até o instante de separação.



**Fig 1** – Dois corpos rígidos em colisão no plano.  $P_y$  é o impulso normal e  $P_x$  é o impulso tangencial. Note também que o eixo referencial que vamos adotar tem sua origem no ponto de contato entre os corpos, sendo o eixo  $y$  normal á superfície de contato . O corpo 1 tem centro de gravidade  $(x_1, y_1)$  e o corpo 2 tem centro de gravidade  $(x_2, y_2)$  .

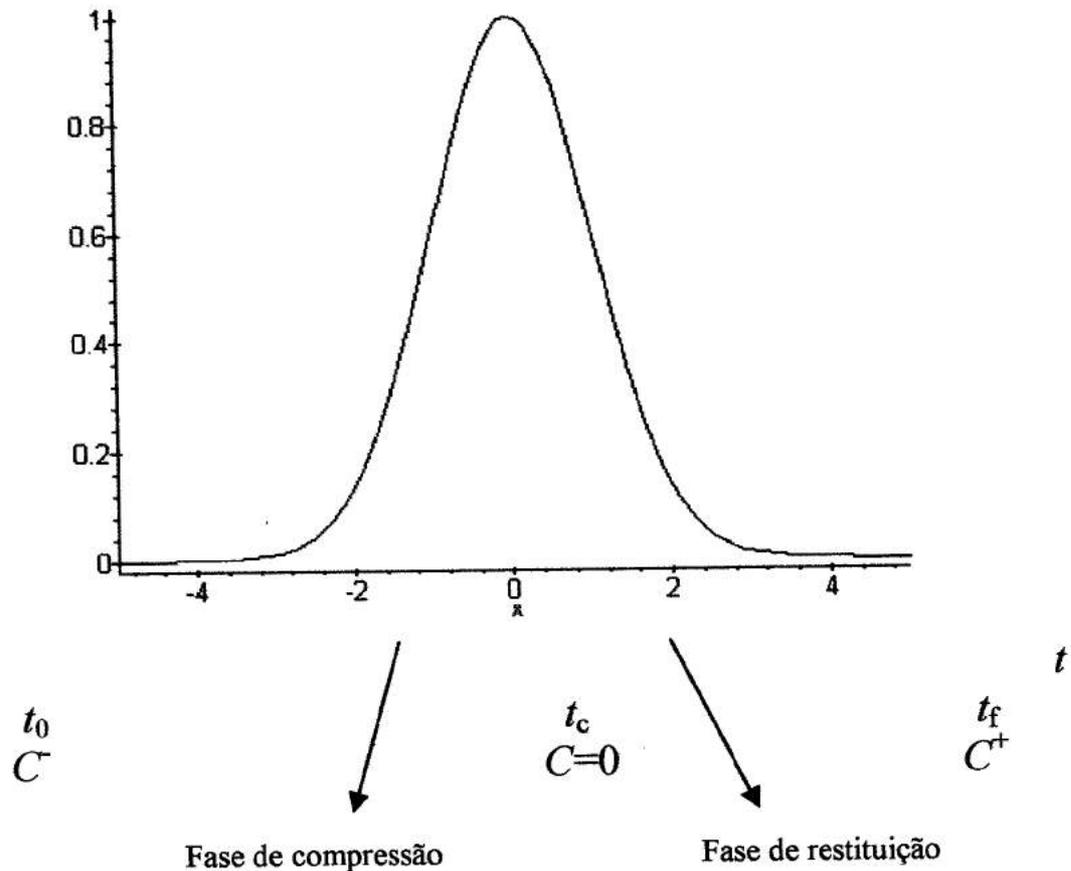
## 2.1 - Coeficiente de Restituição.

Durante o breve contato a força normal  $F_y$ , varia. Quando  $t = 0$  a  $F_y$  é igual a zero,  $F_y$  é máxima na compressão máxima e depois a  $F_y$  volta a decrescer até se anular  $t = t_f$ . O impulso normal varia em função da força normal conforme a equação (1):

$$P_y = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \int F_y(t) dt \quad (1)$$

Onde os significados dos símbolos encontra-se na lista de símbolos. O gráfico fictício da fig-2 ilustra a variação da força normal  $F_y$ , em função do tempo.

$F(t)$



**Fig-2-** Gráfico fictício ilustrando a força normal  $F_y$  em função do tempo. Onde:  $t_0$  - é o tempo inicial,  $t_c$  - é o tempo de compressão,  $t_f$  - é o tempo final,  $C^-$  - é a velocidade relativa de compressão antes do choque e  $C^+$  - é a velocidade relativa de compressão depois do choque.

O exame do gráfico da figura 2 deixa claro que o impulso normal total consiste na soma de duas partes, na fase de compressão temos o impulso normal de compressão ( $P_c$ ), e na fase de restituição temos o impulso normal de restituição ( $P_r$ ).

$$P_y = P_c + P_r \quad (2)$$

Defini-se o coeficiente de restituição ( $e$ ), que relaciona a fase de compressão com a fase de restituição. O coeficiente de restituição depende somente do material dos corpos envolvidos no choque.

O cálculo do coeficiente de restituição ( $e$ ) pode ser feito sobre duas hipóteses:

- A Hipótese de Poisson
- A Lei de Newton da Restituição

Pela hipótese de Poisson o coeficiente de restituição é definido como a razão entre o impulso na fase de restituição e o impulso na fase de compressão,

$$e \equiv \frac{P_r}{P_c} \quad (3)$$

Pela Lei de Newton da Restituição o coeficiente de restituição é definido como o negativo da razão da velocidade relativa de compressão depois do choque com a velocidade relativa de compressão antes do choque,

$$e \equiv -\frac{C^+}{C^-} \quad (4)$$

O coeficiente de restituição varia sempre entre  $0 \leq e \leq 1$ .

Dois casos particulares de choques tem interesse especial:

- Choque perfeitamente Plástico ocorre quando  $e=0$ , não há período de restituição, ambos os corpos permanecem juntos após o choque.
- Choque perfeitamente elástico ocorre quando  $e=1$ , o impulso durante o período de compressão é igual ao impulso durante o período de restituição.

# Modelagem Simplificada de Choques Mecânicos em Satélite Durante a Separação do Veículo Lançador

Alex Thaumaturgo Dias  
Aluno da Universidade de Taubaté - Bolsista PIBIC-CNPq/INPE

Orientadores: Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes  
Dr. Mário César Ricci  
Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

Durante o lançamento do satélite brasileiro de coleta de dados SCD-1 ocorreu um fenômeno que permanece ainda sem explicação. Os registros do veículo lançador Pegasus acusam uma taxa de rotação precisa de 120rpm no momento da separação. Ora, em tal circunstância o magnetômetro de bordo do satélite deveria acusar uma leitura praticamente constante visto que a frequência de amostragem deste sensor é 2Hz. Entretanto, desde a primeira passagem sobre a estação de Alcântara, há apenas alguns minutos após a separação, os dados de leitura do magnetômetro já apresentavam uma nítida oscilação numa frequência correspondente a 118.2rpm.

Uma das possíveis causas do fenômeno seria a ocorrência de colisão acidental durante a delicada fase de separação entre o satélite e a coifa de seu veículo lançador. Nesta etapa ambos, satélite e foguete encontram-se rotacionados, de modo que qualquer desbalanceamento na ação dos dispositivos de separação induz movimentos de nutação que podem levar eventualmente a uma colisão.

O propósito deste trabalho é justamente fornecer ferramentas que contribuam para verificar de forma objetiva a ocorrência deste tipo de colisão por meio da previsão do movimento de atitude do satélite posteriormente ao choque. Num primeiro momento o estudo se concentrou na caracterização e classificação dos choques mecânicos no plano. Foram consideradas a lei de Newton para choques mecânicos e a hipótese de Poisson. Os resultados até aqui obtidos são apresentados na forma de mapas em função do coeficiente de atrito entre os materiais e do coeficiente de restituição do choque. Numa Segunda fase pretende-se estender a análise para o caso tri-dimensional, e finalmente aplicar os resultados ao caso satélite-foguete. Ensaios experimentais são também vislumbrados.

## **Bibliografia**

1. Wang, Y. and Mason, M.T. "Two-Dimensional Rigid Body Collisions With Friction" *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 59, pp. 635-642, Sept. 1992.
2. Fonseca, I. M. "Dinâmica da Separação entre o Último Estágio do Veículo Lançador e do Satélite." *Anais, IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, pgs. 915-917. Florianópolis, SC, Dezembro de 1988.
3. Fonseca, I. M. "A Preliminary Study of Separation Dynamics of the First Brazilian Satellite From Its Launch Vehicle." [A-ETD-0038] INPE, São José dos Campos, SP, abril de 1988.
4. Fonseca, I. M. "Dynamic Analysis of the Last Stage-Spacecraft Separation With Initial Condition Set By The Stabilization Mechanism Of The Launcher." [A-ETD-0041] INPE, São José dos Campos, SP.

# Modelagem Simplificada de Choques Mecânicos em Satélite Durante a Separação do Veículo Lançador

Alex Thaumaturgo Dias  
Aluno da Universidade de Taubaté - Bolsista PIBIC-CNPq/INPE

Orientadores: Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes  
Dr. Mário César Ricci  
Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

Durante o lançamento do satélite brasileiro de coleta de dados SCD-1 ocorreu um fenômeno que permanece ainda sem explicação. Os registros do veículo lançador Pegasus acusam uma taxa de rotação precisa de 120rpm no momento da separação. Ora, em tal circunstância o magnetômetro de bordo do satélite deveria acusar uma leitura praticamente constante visto que a frequência de amostragem deste sensor é 2Hz. Entretanto, desde a primeira passagem sobre a estação de Alcântara, há apenas alguns minutos após a separação, os dados de leitura do magnetômetro já apresentavam uma nítida oscilação numa frequência correspondente a 118.2rpm.

Uma das possíveis causas do fenômeno seria a ocorrência de colisão acidental durante a delicada fase de separação entre o satélite e a coifa de seu veículo lançador. Nesta etapa ambos, satélite e foguete encontram-se rotacionados, de modo que qualquer desbalanceamento na ação dos dispositivos de separação induz movimentos de nutação que podem levar eventualmente a uma colisão.

O propósito deste trabalho é justamente fornecer ferramentas que contribuam para verificar de forma objetiva a ocorrência deste tipo de colisão por meio da previsão do movimento de atitude do satélite posteriormente ao choque. Num primeiro momento o estudo se concentrou na caracterização e classificação dos choques mecânicos no plano. Foram consideradas a lei de Newton para choques mecânicos e a hipótese de Poisson. Os resultados até aqui obtidos são apresentados na forma de mapas em função do coeficiente de atrito entre os materiais e do coeficiente de restituição do choque. Numa Segunda fase pretende-se estender a análise para o caso tri-dimensional, e finalmente aplicar os resultados ao caso satélite-foguete. Ensaio experimentais são também vislumbrados.

## **Bibliografia**

1. Wang, Y. and Mason, M.T. "Two-Dimensional Rigid Body Collisions With Friction" *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 59, pp. 635-642, Sept. 1992.
2. Fonseca, I. M. "Dinâmica da Separação entre o Último Estágio do Veículo Lançador e do Satélite." *Anais, IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, pgs. 915-917. Florianópolis, SC, Dezembro de 1988.
3. Fonseca, I. M. "A Preliminary Study of Separation Dynamics of the First Brazilian Satellite From Its Launch Vehicle." [A-ETD-0038] INPE, São José dos Campos, SP, abril de 1988.
4. Fonseca, I. M. "Dynamic Analysis of the Last Stage-Spacecraft Separation With Initial Condition Set By The Stabilization Mechanism Of The Launcher." [A-ETD-0041] INPE, São José dos Campos, SP.

# Modelagem Simplificada de Choques Mecânicos em Satélite Durante a Separação do Veículo Lançador

Alex Thaumaturgo Dias  
Aluno da Universidade de Taubaté - Bolsista PIBIC-CNPq/INPE

Orientadores: Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes  
Dr. Mário César Ricci  
Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

Durante o lançamento do satélite brasileiro de coleta de dados SCD-1 ocorreu um fenômeno que permanece ainda sem explicação. Os registros do veículo lançador Pegasus acusam uma taxa de rotação precisa de 120rpm no momento da separação. Ora, em tal circunstância o magnetômetro de bordo do satélite deveria acusar uma leitura praticamente constante visto que a frequência de amostragem deste sensor é 2Hz. Entretanto, desde a primeira passagem sobre a estação de Alcântara, há apenas alguns minutos após a separação, os dados de leitura do magnetômetro já apresentavam uma nítida oscilação numa frequência correspondente a 118.2rpm.

Uma das possíveis causas do fenômeno seria a ocorrência de colisão acidental durante a delicada fase de separação entre o satélite e a coifa de seu veículo lançador. Nesta etapa ambos, satélite e foguete encontram-se rotacionados, de modo que qualquer desbalanceamento na ação dos dispositivos de separação induz movimentos de nutação que podem levar eventualmente a uma colisão.

O propósito deste trabalho é justamente fornecer ferramentas que contribuam para verificar de forma objetiva a ocorrência deste tipo de colisão por meio da previsão do movimento de atitude do satélite posteriormente ao choque. Num primeiro momento o estudo se concentrou na caracterização e classificação dos choques mecânicos no plano. Foram consideradas a lei de Newton para choques mecânicos e a hipótese de Poisson. Os resultados até aqui obtidos são apresentados na forma de mapas em função do coeficiente de atrito entre os materiais e do coeficiente de restituição do choque. Numa Segunda fase pretende-se estender a análise para o caso tri-dimensional, e finalmente aplicar os resultados ao caso satélite-foguete. Ensaios experimentais são também vislumbrados.

## **Bibliografia**

1. Wang, Y. and Mason, M.T. "Two-Dimensional Rigid Body Collisions With Friction" *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 59, pp. 635-642, Sept. 1992.
2. Fonseca, I. M. "Dinâmica da Separação entre o Último Estágio do Veículo Lançador e do Satélite." *Anais, IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, pgs. 915-917. Florianópolis, SC, Dezembro de 1988.
3. Fonseca, I. M. "A Preliminary Study of Separation Dynamics of the First Brazilian Satellite From Its Launch Vehicle." [A-ETD-0038] INPE, São José dos Campos, SP, abril de 1988.
4. Fonseca, I. M. "Dynamic Analysis of the Last Stage-Spacecraft Separation With Initial Condition Set By The Stabilization Mechanism Of The Launcher." [A-ETD-0041] INPE, São José dos Campos, SP.

# Modelagem Simplificada de Choques Mecânicos em Satélite Durante a Separação do Veículo Lançador

Alex Thaumaturgo Dias  
Aluno da Universidade de Taubaté - Bolsista PIBIC-CNPq/INPE

Orientadores: Dr. Roberto Vieira da Fonseca Lopes  
Dr. Mário César Ricci  
Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

Durante o lançamento do satélite brasileiro de coleta de dados SCD-1 ocorreu um fenômeno que permanece ainda sem explicação. Os registros do veículo lançador Pegasus acusam uma taxa de rotação precisa de 120rpm no momento da separação. Ora, em tal circunstância o magnetômetro de bordo do satélite deveria acusar uma leitura praticamente constante visto que a frequência de amostragem deste sensor é 2Hz. Entretanto, desde a primeira passagem sobre a estação de Alcântara, há apenas alguns minutos após a separação, os dados de leitura do magnetômetro já apresentavam uma nítida oscilação numa frequência correspondente a 118.2rpm.

Uma das possíveis causas do fenômeno seria a ocorrência de colisão acidental durante a delicada fase de separação entre o satélite e a coifa de seu veículo lançador. Nesta etapa ambos, satélite e foguete encontram-se rotacionados, de modo que qualquer desbalanceamento na ação dos dispositivos de separação induz movimentos de nutação que podem levar eventualmente a uma colisão.

O propósito deste trabalho é justamente fornecer ferramentas que contribuam para verificar de forma objetiva a ocorrência deste tipo de colisão por meio da previsão do movimento de atitude do satélite posteriormente ao choque. Num primeiro momento o estudo se concentrou na caracterização e classificação dos choques mecânicos no plano. Foram consideradas a lei de Newton para choques mecânicos e a hipótese de Poisson. Os resultados até aqui obtidos são apresentados na forma de mapas em função do coeficiente de atrito entre os materiais e do coeficiente de restituição do choque. Numa Segunda fase pretende-se estender a análise para o caso tri-dimensional, e finalmente aplicar os resultados ao caso satélite-foguete. Ensaio experimentais são também vislumbrados.

## **Bibliografia**

1. Wang, Y. and Mason, M.T. "Two-Dimensional Rigid Body Collisions With Friction" *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 59, pp. 635-642, Sept. 1992.
2. Fonseca, I. M. "Dinâmica da Separação entre o Último Estágio do Veículo Lançador e do Satélite." *Anais, IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, pgs. 915-917. Florianópolis, SC, Dezembro de 1988.
3. Fonseca, I. M. "A Preliminary Study of Separation Dynamics of the First Brazilian Satellite From Its Launch Vehicle." [A-ETD-0038] INPE, São José dos Campos, SP, abril de 1988.
4. Fonseca, I. M. "Dynamic Analysis of the Last Stage-Spacecraft Separation With Initial Condition Set By The Stabilization Mechanism Of The Launcher." [A-ETD-0041] INPE, São José dos Campos, SP.

$$\frac{P_y(t_f)}{P_y(t_c)} = 1 + e. \quad (27)$$

A equação (27) é exclusiva para a Hipótese de Poisson.

### 3.2.2 - Atrito

O atrito causa no ponto de contato uma força na direção tangencial  $F_x$ . Segundo a lei de atrito esta força tangencial  $F_x$  dependem da força normal  $F_y$  e do coeficiente de atrito entre os corpos.

$$|F_x| \leq \mu F_y \quad (28)$$

A equação (28) nos mostra dois casos diferentes possíveis:

Se  $|dP_x| < \mu dP_y$  temos a aderência (“sticking”)

e se  $|dP_x| = \mu dP_y$  temos o deslizamento (“sliding”)

No caso de aderência concluir-se que a componente tangencial relativa da velocidade vale zero ( $S=0$ ) e substituir na equação (17) tem-se:

$$S_0 + P_x B_1 - P_y B_3 = 0 \quad (29)$$

A equação (29) fornece a chamada *linha de aderência*.

### 3.3 - Processo do impacto

Para resolver o problema do impacto é salutar recorrer a ajuda de um gráfico onde o eixo da abscissa será o impulso na direção tangencial  $P_x$  e o eixo das ordenadas será o impulso na direção normal  $P_y$ . No começo do impacto o impulso  $P$  esta na origem, e durante o impacto o impulso normal  $P_y$  aumenta até a Lei de Restituição, quando acaba o choque .

Esta lei da restituição pode ser a Lei de Newton ou a Hipótese de Poisson.

Para construir o gráfico é necessário definir mais um equação, esta equação é chamada de *linha do limite de atrito*.

Segundo a lei do atrito temos:

$$P_x = -\mu s' P_y \quad (30)$$

onde  $s'$  é o sinal da velocidade inicial de escorregamento  $S_0$ .

$$s' = \frac{S_0}{|S_0|} \quad \text{se } S_0 \neq 0$$

Podemos resumir o processo em poucas linhas:

- 1- O ponto P se movimenta inicialmente ao longo da linha limite de atrito.
- 2- Se P alcançar a linha de aderência,  $S=0$ , então P muda para a linha de aderência (ou seja cessa o escorregamento) ou para a linha limite reverso de atrito (ou seja a uma reversão no escorregamento).
- 3- O final do choque ocorre quando:
  - (a) Por Newton: P alcança a linha de terminação
  - (b) Por Poisson:  $P_y$  alcançar o valor de  $(1+e)$  vezes o valor de  $P_y$  na linha de compressão máxima.

### 3.4 – Classificação do impacto e modo de contato.

Com as equações definidas nos itens 3.1, 3.2 e 3.4, linha de aderência, linha de máxima compressão, linha de terminação, linha limite de atrito e os valores de  $B_3$ ,  $S_0$ ,  $C_0$ , podemos começar a classificação.

#### 3.4.1 - Classificação do impacto

O impacto pode ser classificado como, *direto* ou *obliquo*, *central* ou *excêntrico*, *tangencial* ou *parcial*, a classificação depende dos valores de  $B_3$ ,  $S_0$ ,  $C_0$ .

- Se a velocidade relativa inicial de escorregamento for zero ( $S_0=0$ ), tem-se o chamado impacto *direto* ou seja as velocidades são dirigidas ao longo da normal do choque, caso contrario o impacto é *obliquo*.

- Se  $B_3=0$  o impacto é chamado *central* ou seja se os centros de massa dos dois corpos que colidem estão localizados na mesma normal, caso contrario é *excêntrico*.

- Se a velocidade relativa inicial de compressão for zero ( $C_0=0$ ), tem-se o chamado impacto *tangencial*, também é muito natural a colisão com a velocidade relativa inicial de compressão maior que zero ( $C_0 < 0$ ), que nos podemos chamar de impacto *parcial*.

Considerando-se ( $S_0=0$ ) e ( $B_3=0$ ) ou seja um choque *central e direto* tem-se então um choque que pode ser representado como choque sobre uma reta, note que o choque sobre uma reta é um caso particular do choque sobre o plano.

### 3.4.2 - Classificação dos modos de contato :

O modo de contato pode ser determinado de maneira simples com o auxílio de um gráfico. Na análise que se segue considerar-se-á  $C_0 < 0$  e  $B_3 < 0$  (ver figura 3). Outros casos podem ser analisados similarmente. O gráfico tem eixos ( $P_x$ ,  $P_y$ ), como já foi citado anteriormente, nele estão representadas as linhas de terminação, compressão máxima, de aderência e linha limite de atrito. Considera-se inicialmente que um ponto  $P(P_x, P_y)$  fornecendo o impulso, á partir da origem  $O$ , ao longo de uma reta a medida que o choque se desenvolve.

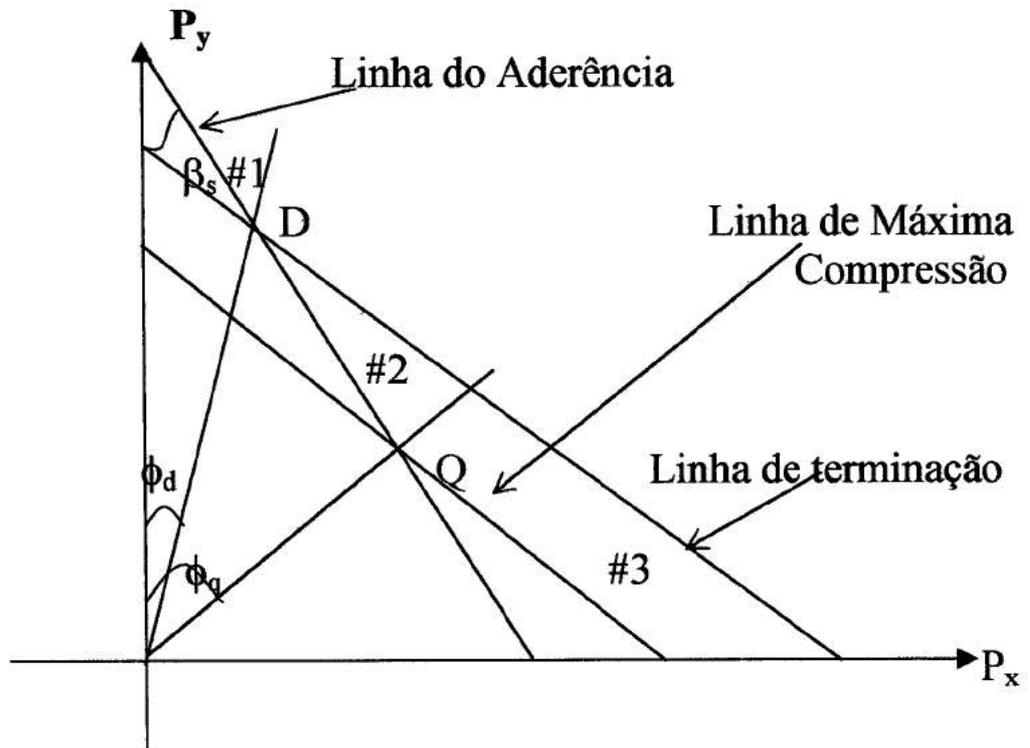


Fig3- Gráfico para auxiliar a classificação do modo de contato

O plano ( $P_x$ ,  $P_y$ ) pode ser dividido em três regiões pelas linhas  $OD$  e  $OQ$ . Neste caso Poisson e Newton dão resultados idênticos.

Observe na região #1 o ponto  $P$  atinge a linha de terminação antes de atingir a linha de aderência, na região #2 o ponto  $P$  atinge a linha de aderência na fase de restituição e na região #3 o ponto  $P$  atinge a linha de aderência na fase de compressão.

Estas regiões podem ser usadas para classificar o modo de contato no impacto.

Para um impacto oblíquo temos cinco modos de contato possíveis: (1) Escorregamento (“Sliding”), (2) aderência na fase de compressão (“C-Sticking”), (3) aderência na fase de restituição (“R-Sticking”), (4) Reversão do escorregamento na fase de compressão (“C-Reversed Sliding”), (5) Reversão do escorregamento na fase de restituição (“R-Reversed Sliding”).

A classificação também depende dos valores do coeficiente de atrito ( $\mu$ ), do coeficiente de atrito no ponto d ( $\mu_d$ ), do coeficiente de atrito no ponto q ( $\mu_q$ ), do coeficiente de atrito da reta de sticking ( $\mu_s$ ), do impulso normal do ponto d ( $P_d$ ) e do impulso normal no ponto q ( $P_q$ ).

$$\mu = \operatorname{tg} \alpha \quad (31)$$

$$\mu_d = \frac{B_3(1+e)C_0 + B_2S_0}{B_1(1+e)C_0 + B_3S_0} \quad (32)$$

$$\mu_q = \frac{B_3C_0 + B_2S_0}{B_3S_0 + B_1C_0} \quad (33)$$

$$\mu_s = -\frac{B_3}{B_1} \quad (34)$$

$$P_d = (B_2 + s\mu B_3)sS_0 \quad (35)$$

$$P_q = (\mu B_1 + sB_3)(-C_0) \quad (36)$$

Se o impacto for *direto* ou seja ( $S_0=0$ ) a região #2 desaparece,  $\mu_d$  e  $\mu_q$  tem o mesmo valor que  $\mu_s$  e a linha aderência passa pela origem. Somente dois modos de contatos são possíveis aderência na fase de compressão ou escorregamento. Não há possibilidade de ocorrer o contato do tipo com reversão do escorregamento.

$$\mu < |\mu_s| \quad \text{Para escorregamento ("sliding")} \quad (37)$$

$$\mu > |\mu_s| \quad \text{Para aderência ("sticking")} \quad (38)$$

Tabela 1 - Modos de contatos no impacto, onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito.

	$\mu > \mu_s$	$\mu < \mu_s$
$P_d > (1+e)P_q$	Sliding	Sliding
$P_q < P_d < (1+e)P_q$	R- Sticking	R- Reversed Sliding
$P_d < P_q$	C- Sticking	C- Reversed Sliding

Vamos calcular os impulsos ( $P_x, P_y$ ) para cada tipo de contato definido na tabela 2.

Primeiro será usado a hipótese de Poisson:

É importante lembrar que o choque chega ao fim quando  $P_y$  atinge o valor de  $(1+e)$  vezes impulso normal na compressão máxima

$$P_y = P_c(1+e).$$

Cada tipo de contato tem um impulso tangencial diferente e substituindo  $P_x$  na (24), encontrar-se o valor de  $P_c$  e depois substituindo  $P_c$  na equação anterior encontrar-se o valor final de  $P_y$ .

✓ Sliding :

$$P_x = -s' \mu P_y \quad (39)$$

$$P_y = -(1+e) \frac{C_0}{(B_3 s' \mu + B_2)} \quad (40)$$

✓ C- Sticking :

$$P_x = \frac{B_3 P_y - S_0}{B_1} \quad (41)$$

$$P_y = -(1+e) \frac{B_1 C_0 + B_3 S_0}{B_1 B_2 - B_3^2} \quad (42)$$

✓ R-Sticking :

$$P_x = \frac{B_3 P_y - S_0}{B_1} \quad (43)$$

$$P_y = -(1+e) \frac{C_0}{(B_3 s' \mu + B_2)} \quad (44)$$

✓ C- Reversed Sliding:

$$P_x = s' \mu \left[ P_y - \frac{2S_0}{B_3 + s' \mu B_1} \right] \quad (45)$$

$$P_y = -\frac{1+e}{B_2 - s' \mu B_3} \left[ C_0 + \frac{2s' \mu B_3 S_0}{B_3 + s' \mu B_1} \right] \quad (46)$$

✓ R- Reversed Sliding:

$$P_x = s' \mu \left[ P_y - \frac{2S_0}{B_3 + s' \mu B_1} \right] \quad (47)$$

$$P_y = -(1+e) \frac{C_0}{(B_3 s' \mu + B_2)} \quad (48)$$

Onde:

$$s' \begin{cases} \frac{S_0}{|S_0|} & \text{se } S_0 \neq 0 \\ 1 & \text{se } S_0 = 0 \end{cases} \quad (49)$$

Vamos novamente calcular os impulsos ( $P_x, P_y$ ) para cada tipo de contato definido na tabela 2, só que será usado a lei de Newton da restituição:

É importante lembrar que o choque chega ao fim quando  $P_y$  atinge a linha de terminação:

Cada tipo de contato tem impulso tangencial diferente  $P_x$  e substituindo na equação (26) encontrar-se o impulso normal  $P_y$  no final do contato.

✓ Sliding:

$$P_x = -s' \mu P_y \quad (50)$$

$$P_y = -(1+e) \frac{C_0}{B_2 + s' \mu B_3} \quad (51)$$

✓ Sticking (C- Sticking ou R- Sticking):

$$P_x = -\frac{(1+e)B_3C_0 + B_2S_0}{B_1B_2 - B_3^2} \quad (52)$$

$$P_y = -\frac{S_0B_3 + (1+e)B_1C_0}{(B_1B_2 - B_3^2)} \quad (53)$$

✓ Reversed Sliding (C- Reversed Sliding ou R- Reversed Sliding):

$$P_x = s' \mu \left[ P_y - \frac{2S_0}{B_3 + s' \mu B_1} \right] \quad (54)$$

$$P_y = -\frac{1}{B_2 - s' \mu B_3} \left[ (1+e)C_0 + \frac{2s' \mu B_3 S_0}{B_3 + s' \mu B_1} \right] \quad (55)$$

onde  $s'$  é definido na equação (49).

Note também que no sticking  $P_x$  e  $P_y$  não dependem do coeficiente de atrito.

## Capítulo 4

### Perda de Energia

Alguns métodos para resolver impactos de corpos rígidos violam o princípio da conservação de energia.

Definiremos a equação para cálculo da variação de energia no impacto. Onde  $T_1$  e  $T_2$  são as energias cinética do corpo 1 e corpo 2 respectivamente.

$$\Delta T = [T_1(t_f) + T_2(t_f)] - [T_1(t_0) + T_2(t_0)]$$

$$\Delta T = \frac{1}{2} P_x (S + S_0) + \frac{1}{2} P_y (C + C_0)$$

$$\Delta T = \frac{1}{2} [P^t (V_c + V_{co})] \quad (\text{na forma de matriz}) \quad (56)$$

$$\text{onde: } P = [P_x, P_y]^t, \quad V_c = [S, C]^t, \quad V_{co} = [S_0, C_0]$$

Substituindo as equações (17) e (18) na equação da energia:

$$\Delta T = \frac{1}{2} (P^t B P + 2V_{co}^t P) \quad (57)$$

Onde:

$$B = \begin{bmatrix} B_1 & -B_3 \\ -B_3 & B_2 \end{bmatrix}$$

Para que aconteça a conservação de energia no choque temos:

$$\Delta T \leq 0 \quad (58)$$

Ou seja em um choque há perda de energia ( $\Delta T < 0$ ) ou no máximo a energia inicial é igual a energia final ( $\Delta T = 0$ ).

## Capítulo 5

### Discussão

Neste capítulo será feita uma comparação entre a hipótese de Poisson com a lei de Newton da restituição. A maior diferença entre Poisson e Newton está na definição do coeficiente de restituição ( $e$ ).

Uma outra diferença está no capítulo 3 quando calculamos os impulsos ( $P_x, P_y$ ) para cada tipo de contato definido na tabela 2, os valores de  $P_x$  e  $P_y$  encontrado pela hipótese de Poisson são diferente dos encontrados pela lei de Newton.

Por Newton o cálculo dos impulsos  $P_x$  e  $P_y$  na fase C- Sticking e R- Sticking tem o mesmo valor enquanto pela hipótese de Poisson tem valores distintos. Isto também acontece na fase C- Reversed Sliding e R- Reversed Sliding.

Estas diferenças no cálculo de  $P_x$  e  $P_y$ , fazem também aparecer uma diferença no cálculo da variação de energia.

## Capítulo 6

### Exemplo

Ilustraremos com um exemplo a discussão feita no capítulo 5. Considerar-se-á para este caso um contato entre os dois corpos do tipo aderência (“Sticking”) ou seja  $\mu > \mu_s$  e também,  $C_0 = -1$ ,  $S_0 = 0.6$ ,  $B_1 = 2.5$ ,  $B_2 = 2.5$ ,  $B_3 = 1.5$  e  $\mu_s = 0.6$ , com estes valores iniciais temos um caso especial a onde há ganho de energia quando calculado pelo lei de Newton.

Por Newton:

$$P_x = -\frac{B_2 S_0 + (1+e)C_0 B_3}{B_1 B_2 - B_3^2} \quad (52)$$

Substituindo a equação (52) pelos dados acima temos:

$$P_x = 0.375e$$

Este é o valor de  $P_x$ .

Calculando  $P_y$ :

$$P_y = -\frac{B_3 S_0 + (1+e)C_0 B_1}{B_1 B_2 - B_3^2} \quad (53)$$

Substituído pelos dados acima temos:

$$P_y = 0.4 + 0.625e$$

Então temos que  $S = 0$  e  $C = e$ , calculando a energia temos:

$$\Delta T = \frac{1}{2}(0.625e^2 - 0.4)$$

Sabe-se que o coeficiente de restituição só pode variar entre 0 e 1, mas observe que na equação anterior se o coeficiente de restituição for maior que 0.8 ( $e > 0.8$ ), o cálculo da variação de energia tem um valor maior que zero ou seja um ganho de energia.

Pela hipótese de Poisson temos:

$$P_x = \frac{B_3 P_y - S_0}{B_1}$$

Substituindo os dados acima temos:

$$P_x = 0.24e$$

Calculando  $P_y$ :

$$P_y = -(1+e) \frac{B_1 C_0 + B_3 S_0}{B_1 B_2 - B_3^2}$$

Substituindo os dados acima temos:

$$P_y = 0.4(1+e)$$

Então temos que  $S = 0$  e  $C = 0.64e$

Calculando a energia temos:

$$\Delta T = \frac{1}{2}(0.256e^2 - 0.4)$$

Por Poisson para qualquer valor de  $e$  entre  $0 \leq e \leq 1$  que for substituído na equação anterior tem-se uma perda de energia.

## Capítulo 7

### Mapeamento das Condições de Choque

Para se fazer o mapeamento será usado as chamadas variáveis adimensionais,

Definições das variáveis:

$$r = \left| \frac{S_o}{C_o} \right| \quad (54)$$

$$\text{sen } \phi = (\text{sinal de } S_o) \frac{B_3}{\sqrt{B_1 B_2}} \quad (55)$$

onde:  $\phi \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ .

$$\text{tg } \beta = \sqrt{\frac{B_1}{B_2}} \quad (56)$$

onde:  $\beta \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ .

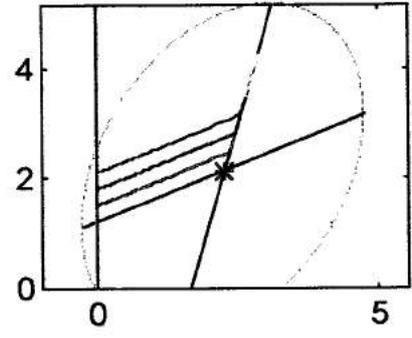
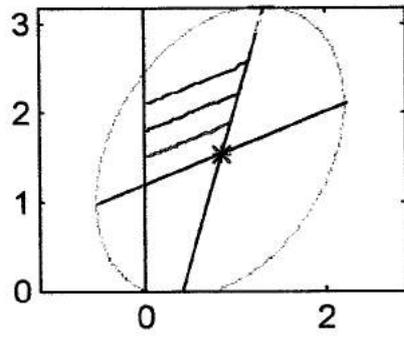
$$\tilde{P}_x = \frac{P_x \sqrt{B_1 B_2}}{C_o (\text{sinal de } S_o)} \quad (57)$$

$$\tilde{P}_y = \frac{P_y \sqrt{B_1 B_2}}{-C_o} \quad (58)$$

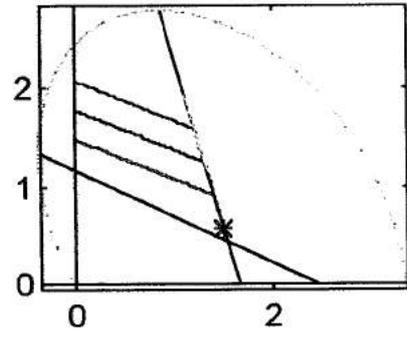
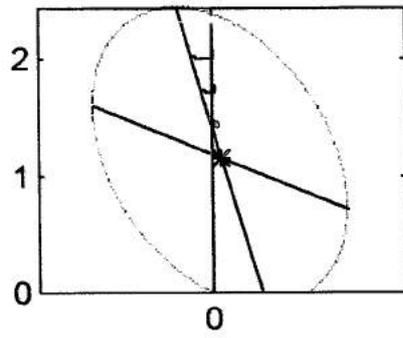
R=0.5

R=2

$\phi=-20$



$\phi=20$

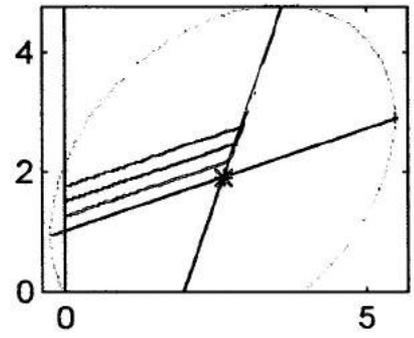
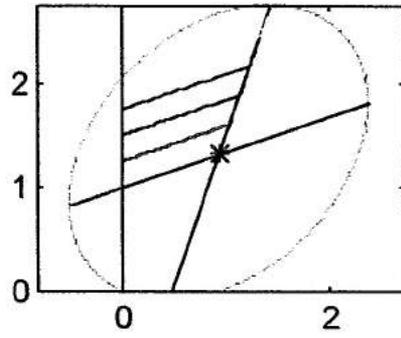


$\beta=40$

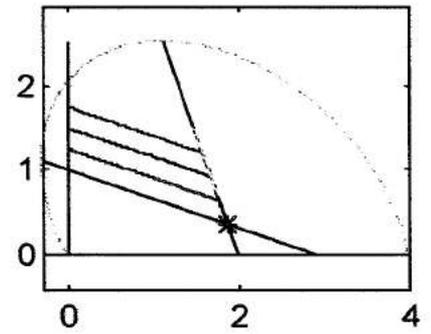
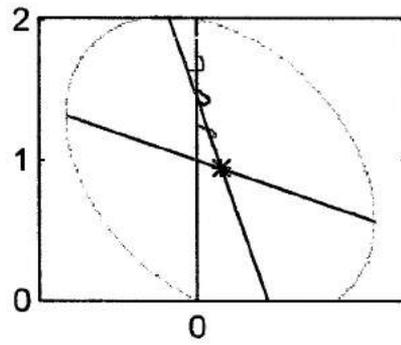
R=0.5

R=2

$\phi=-20$



$\phi=20$

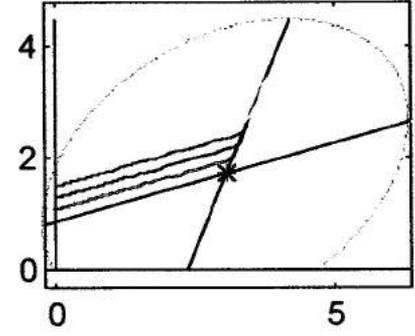
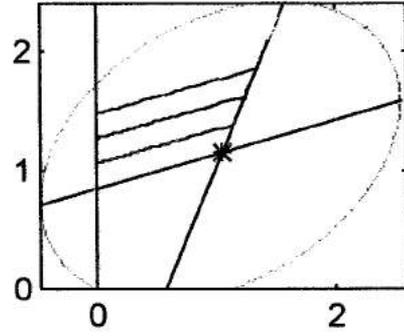


$\beta=45$

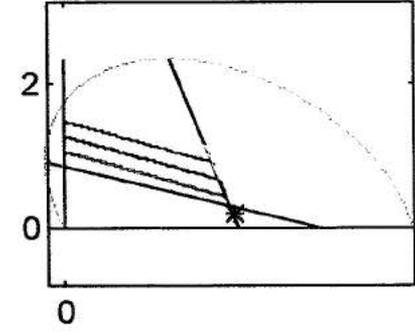
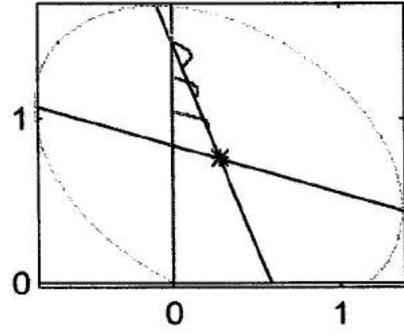
R=0.5

R=2

$\phi=-20$



$\phi=-20$



$\beta=50$

## Capítulo 8

### Conclusão

Este trabalho mostra toda a complexidade de se classificar um choque entre dois corpos rígidos no plano. Esta classificação foi feita com o auxílio de um método gráfico, e o coeficiente de restituição foi calculado sobre duas hipóteses, de Poisson e de Newton.

Há uma diferença entre a Lei de Newton da restituição e a hipótese de Poisson quando se referem ao fim do choque.

Esta diferença entre Newton e Poisson faz com que o cálculo dos impulsos normal e tangencial seja diferente para cada um caso, então isto cria também uma diferença no cálculo da variação de energia.

Em princípio podem-se utilizar diferentes métodos para o cálculo do choque, mas é importante que o método escolhido não viole a teoria da conservação de energia.

Quando se resolve o problema do choque usando a lei de Newton da restituição existem casos especiais onde o cálculo da variação da energia tem como resultado um valor positivo, neste caso Newton viola a teoria da conservação de energia.

Constatou-se então que a Hipótese de Poisson é mais adequada na caracterização dos choques mecânicos.

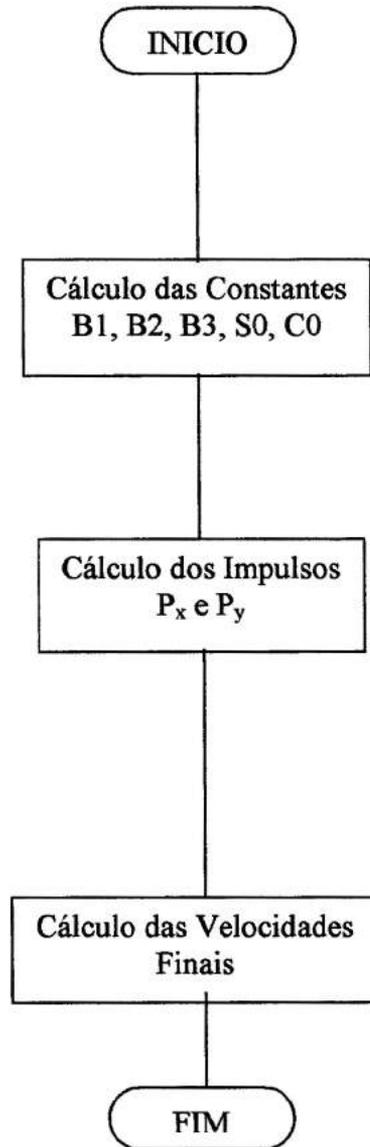
## Capítulo 9

### Referências

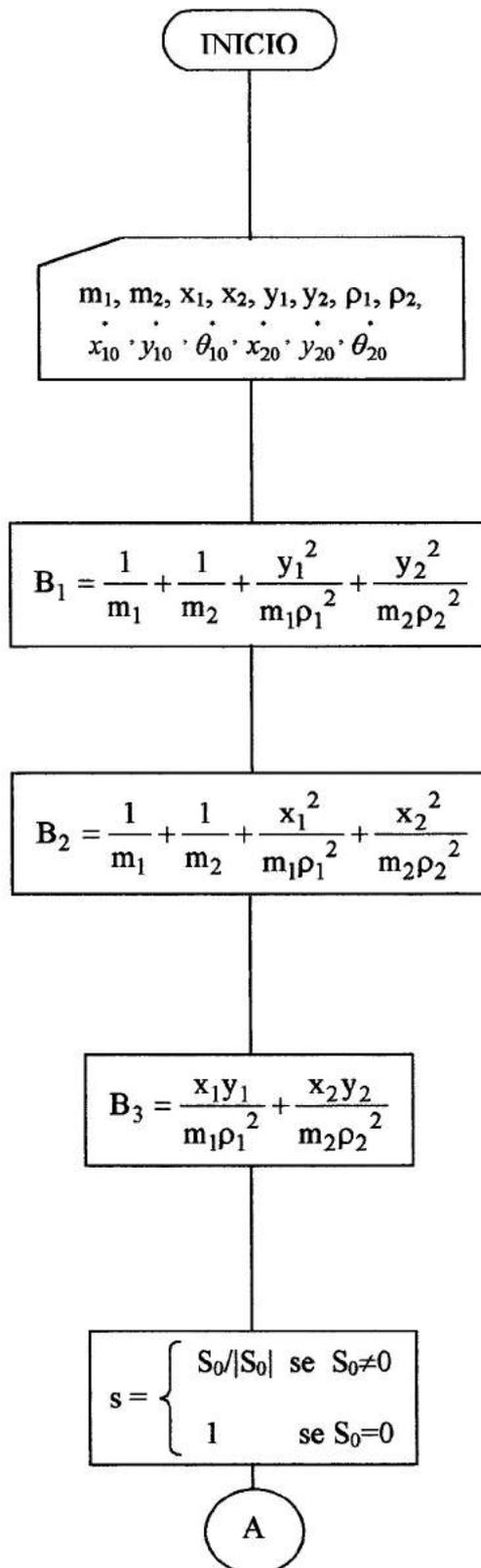
- [1] Beer, F.P. and Johnston , Jr. , E. R . *Vector Mechanics for Engineers*, 4th ., McGraw-Hill, 1984.
- [2] Brach,R.M, Friction , Restitution, and Energy Loss in Planar Colision “ ASME Journal of Applied Mechanics,1984.
- [3] Brach,R.M, “Rigid Body Collisions”, ASME Journal of Applied Mechanics, 1989.
- [4] Keller , J.B, “Impact with Friction “,ASME Journal of Applied Mechanics ,1986.
- [5] Wang , Y , e Masom, T, M, “Two-Dimensional Rigid-Body collisions with friction”, ASME Journal of Applied Mechanics, 1992.
- [6] Fonseca, I. M. ”Dinâmica da Separação entre o Último Estágio do Veículo Lançador e do Satélite “Anais , IX Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, pgs 915-917. Florianópolis ,SC, Dezembro de 1988.
- [7] Fonseca, I. M. “A Preliminary Study of Separation Dynamics of the First From Its Launch Vehicle.”[A-ETD-0038]INPE, São José dos Campos,SP, abril de 1988.
- [8] Fonseca, I. M. “Dynamic Analysis Of The Last-Spacecraft Separation With Initial Condition Set By The Stabilization Mechanism Of The Launcher.”[A-ETD-0041]INPE, São José dos Campos, SP.

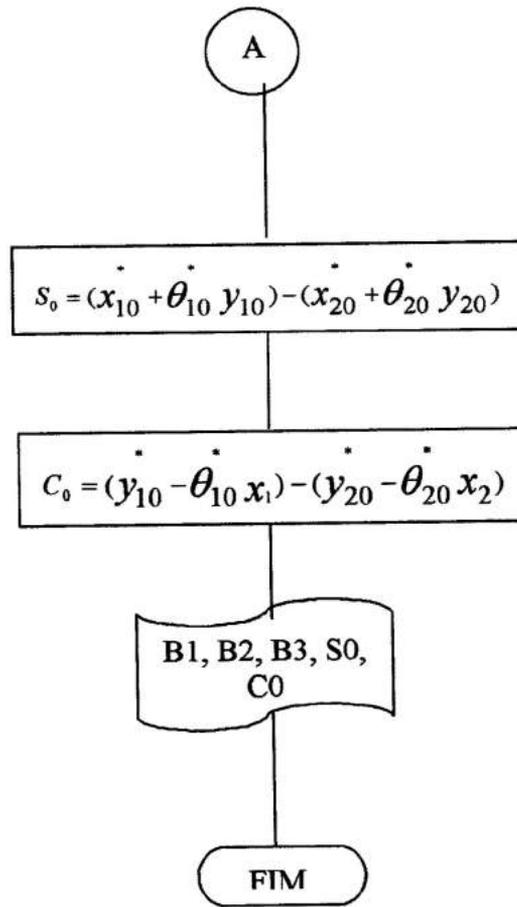
**Apêndice:**

Fluxograma

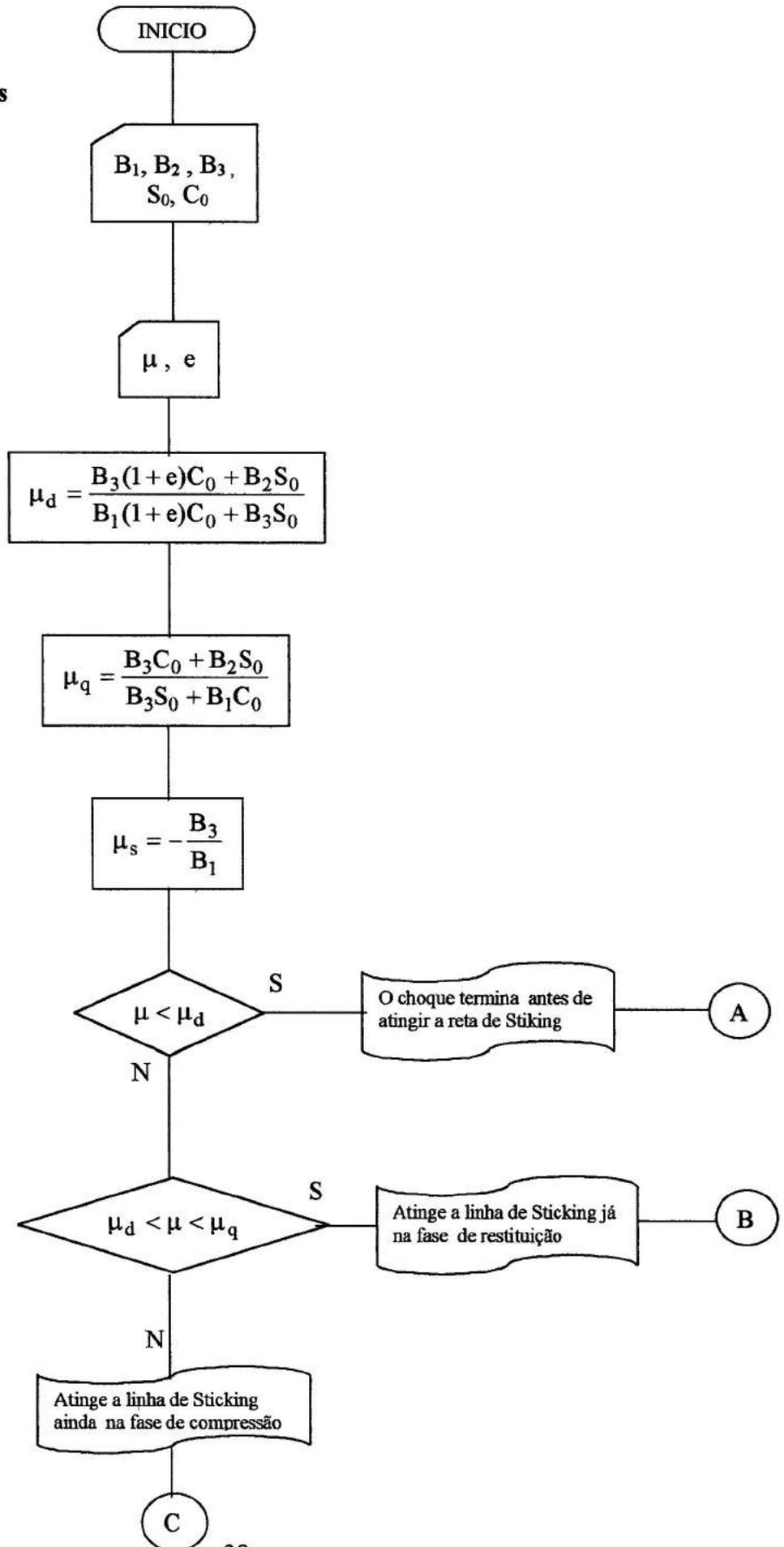


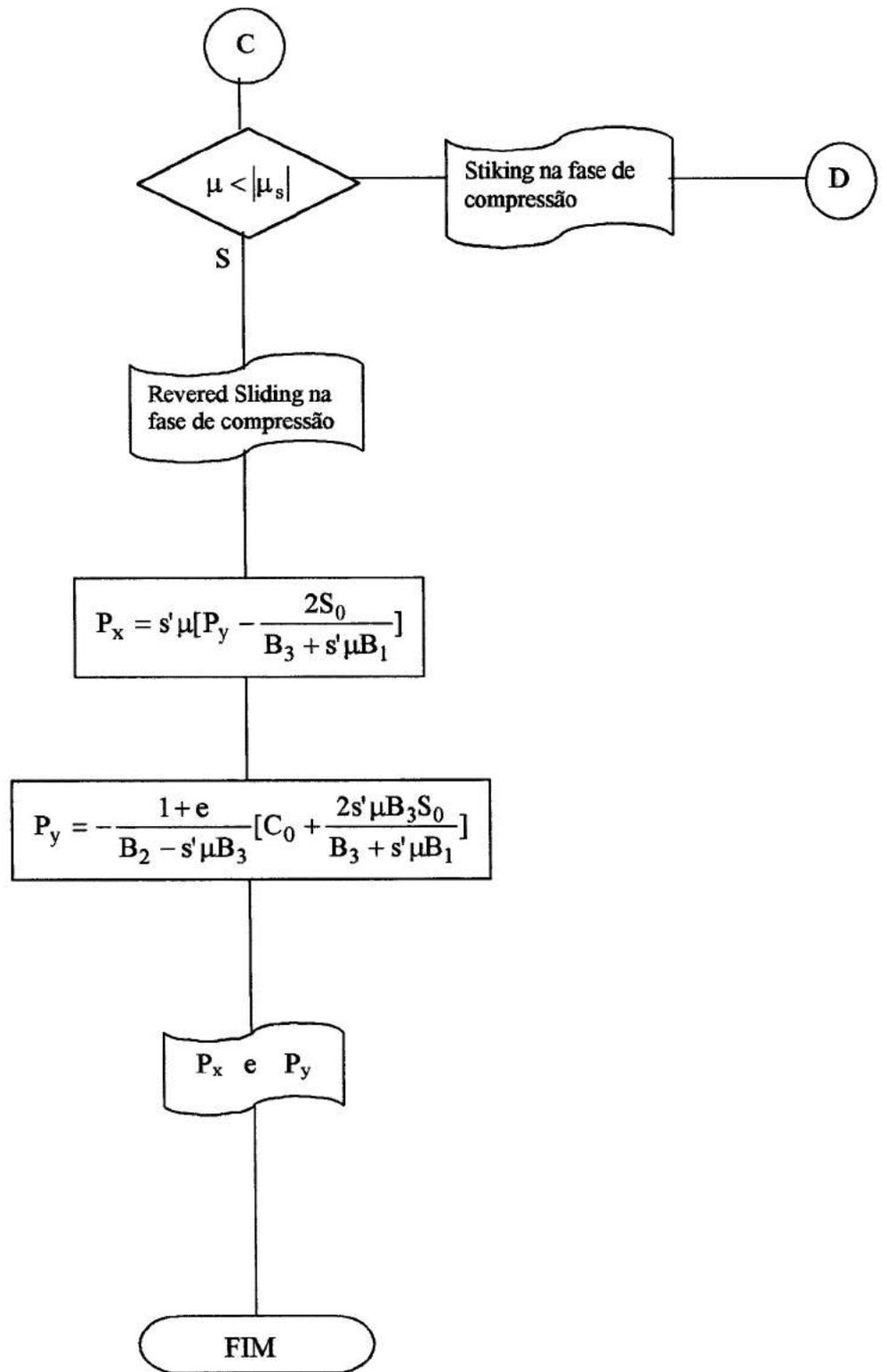
## Cálculo das Constantes

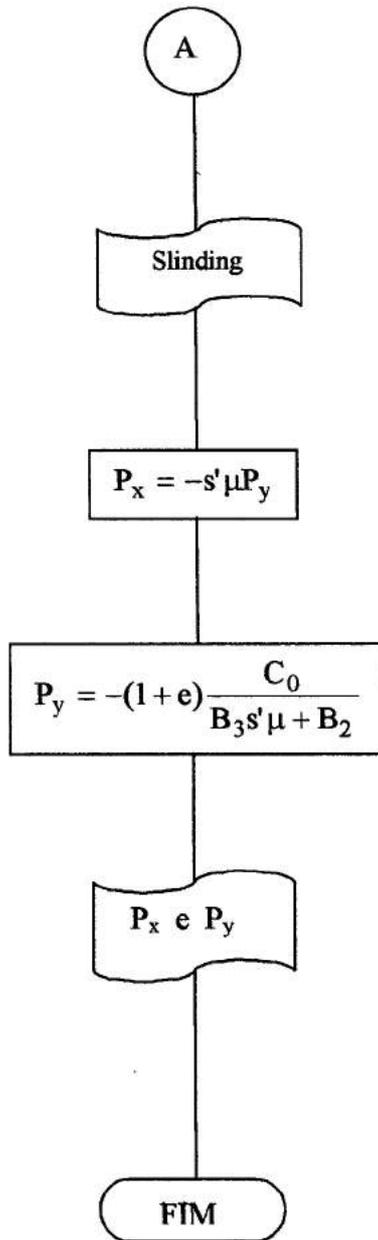


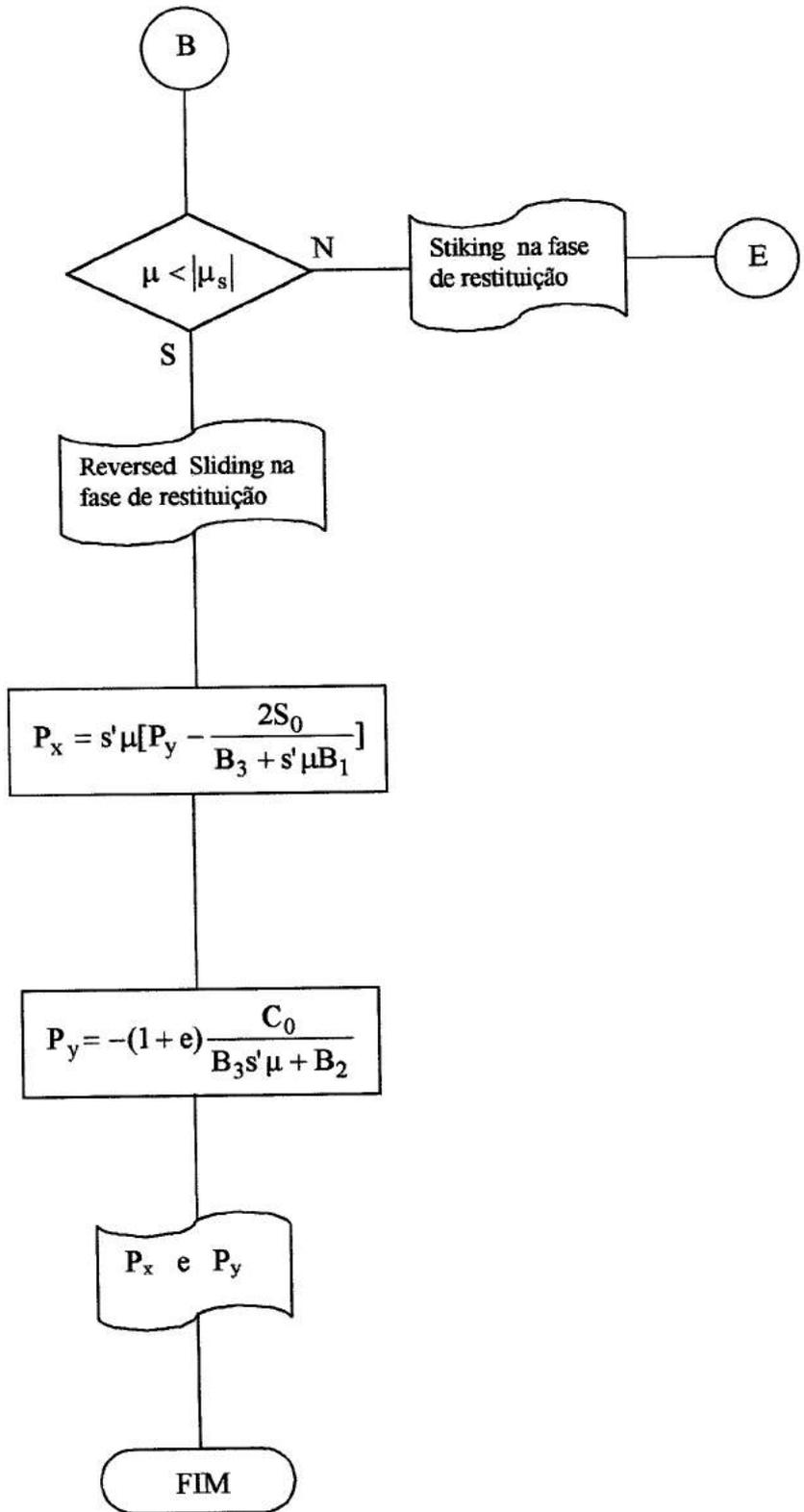


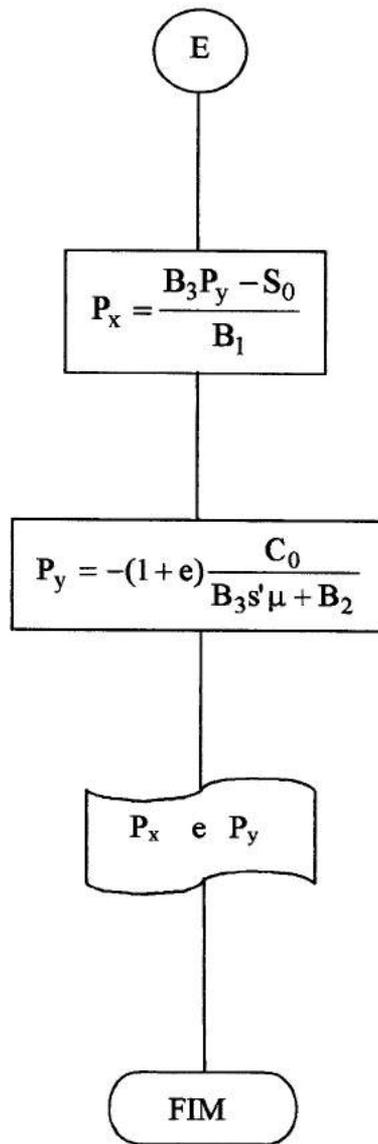
## Cálculo dos Impulsos

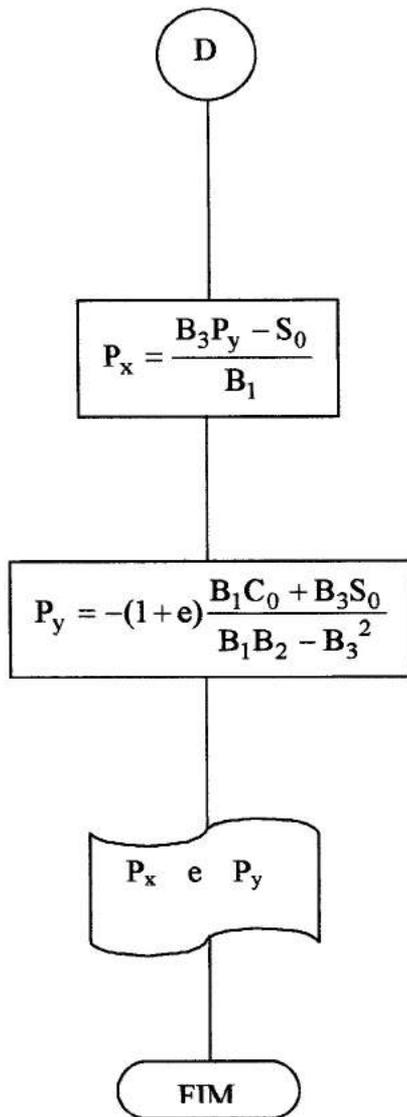




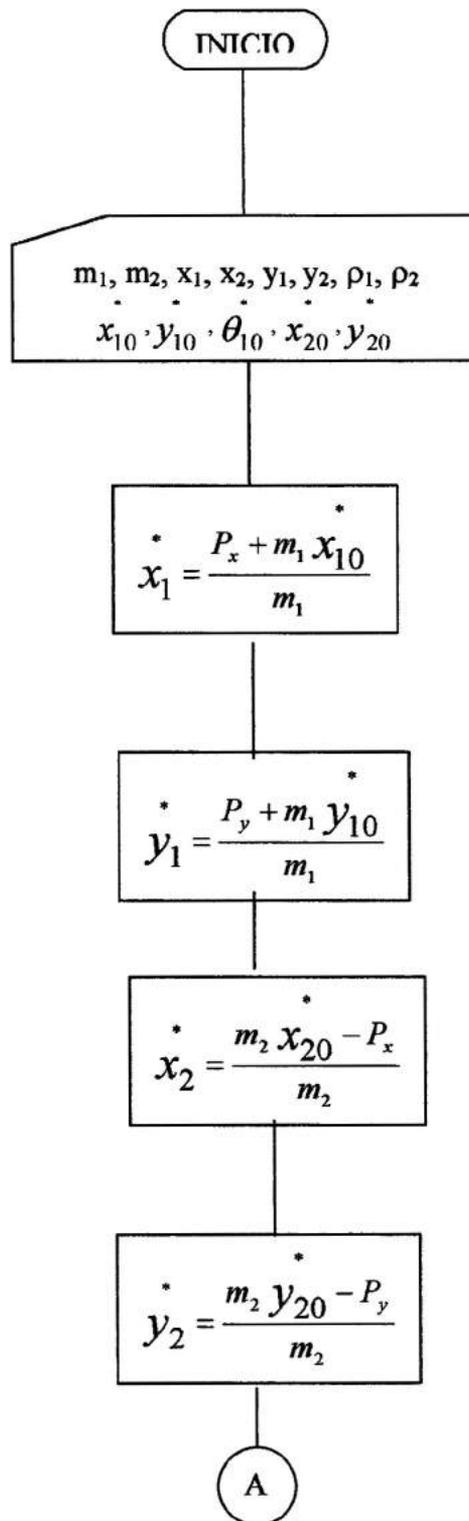








## Cálculo das Velocidades Finais



A

$$\dot{\theta}_1 = \frac{P_x y_1 + m_1 \rho_1^2 \dot{\theta}_{10} - P_y x_1}{m_1 \rho_1^2}$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{P_y x_2 + m_2 \rho_2^2 \dot{\theta}_{20} - P_x y_2}{m_2 \rho_2^2}$$

Velocidades  
Finais

## Apêndice:

### Listagem dos Programas

```
function chockmap(b,f,r)
%mapeamento de choques planos em função dos parâmetros de impacto
%Px.....Impulso normalizado do choque no eixo tangencial;
%Py.....Impulso normalizado no eixo normal aa superfície de contato;
%b.....angulo entre 0 e 90 associado aa inercia nos eixos x e y;
%f.....angulo entre -90 e 90 associado a assimetria do choque;
%r.....razao entre velocidade tangencial e normal;

%***Cálculo dos valores limites do coeficiente de atrito:

tb = tan(b*pi/180);
sf = sin(f*pi/180);
m2 = (r/tb - sf) / (tb - r*sf);
m3 = sf / tb;

%***Cálculo da elipse de iso-energia
B = [tb, sf;
     sf, 1/tb];
Pcr = inv(B) * [r;1];
Ecr = (-1/2) * Pcr*B*Pcr;
[V,D] = eig(B);
theta = [0:359]*pi/180;
u = ones(size(theta));
P = Pcr * u + V * sqrt(2*(0-Ecr) * inv(D)) * [cos(theta);sin(theta)];
I = find(P(2,.)>=0);

%***Cálculo das linhas de máxima compressão e aderência
Pady = [0,max(P(2,))];
Padx = (r-sf*Pady) / tb;
Pmcx = [min(P(1,I)),max(P(1,I))];
eixo=Pmcx;
Pmcy = (1-sf*Pmcx) * tb;
Icr = find(Pmcy<0);
if Icr
    Pmcy(Icr)=0;
    Pmcx(Icr)=1/(sf*tb);
end

%***Mapeamento do choque pela hipótese de Poisson
for i=1:80
    for j=1:4
        m=tan(i*pi/180);
        e=j/4;
```

```
m1 = (r/tb - (1+e)*sf) / ((1+e)*tb - r*sf);
```

```
%***Cáculo de Py:
```

```
Po = r / (m*tb + sf);
```

```
if m<m2
```

```
    Py(i,j) = (1+e) / (1/tb + m*sf);
```

```
    else if m<m3
```

```
        Py(i,j) = (1+e) * (1 - 2*m*sf*Po) / (1/tb - m*sf);
```

```
        else
```

```
            Py(i,j) = (1+e) * (tb - r*sf) / (1 - sf*sf);
```

```
        end
```

```
    end
```

```
%***Cáculo de Px:
```

```
if m<m1
```

```
    Px(i,j) = m * Py(i,j);
```

```
    else if m<m3
```

```
        Px(i,j) = m * (2*Po - Py(i,j));
```

```
        else
```

```
            Px(i,j) = (r - sf*Py(i,j)) / tb;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
        end
```

```
    end
```

```
plot(Pcr(1),Pcr(2),'r*',P(1,1),P(2,1),'r.').hold on
```

```
plot(Padx,Pady,'g--',Pmcx,Pmcy,'g--')
```

```
plot([0,0],[0,max(P(2,:))],'k',eixo,[0,0],'k')
```

```
hold on, plot(Px,Py), colormap(prism),axis equal
```

```
%Programa Pricipal
```

```
figure(1)
```

```
subplot(221),chockmap(40,-20,.5),subplot(222),chockmap(40,-20,2)
```

```
subplot(223),chockmap(40,20,.5),subplot(224),chockmap(40,20,2)
```

```
figure(2)
```

```
subplot(221),chockmap(45,-20,.5),subplot(222),chockmap(45,-20,2)
```

```
subplot(223),chockmap(45,20,.5),subplot(224),chockmap(45,20,2)
```

```
figure(3)
```

```
subplot(221),chockmap(50,-20,.5),subplot(222),chockmap(50,-20,2)
```

```
subplot(223),chockmap(50,20,.5),subplot(224),chockmap(50,20,2)
```