

10 Aplicações

O modelo proposto permite simular, com o uso de um modelo físico, comportamentos de uma classe de objetos variada. Ele pode ser empregado ao modelar objetos tridimensionais por deformações, ou para simulação física. Esse capítulo apresenta diversas aplicações em cada caso.

10.1 Aplicações em Geologia

Tendo o arcabouço necessário para modelar materiais com determinadas propriedades, vamos gerar simulações no contexto de geologia. Para cada exemplo são exibidos o conjunto de parâmetros do modelo, uma descrição sucinta da geometria do problema, e os resultados obtidos durante a simulação.

10.1.1 Introdução sobre a geometria das falhas

Uma falha é uma superfície ou uma faixa estreita na crosta terrestre onde um lado moveu-se relativamente ao outro, em uma direção paralela a superfície ou faixa. A maioria das falhas encontradas na superfície da terra são do tipo rúptil, ou zonas de múltiplas falhas rúpteis paralelas. Também são encontradas falhas do tipo dúctil, veja a figura 10.1. Nas falhas dúcteis o movimento preserva a continuidade deformando as rochas.

O termo falha é usado para movimentos que se estendem a metros, para movimentos menores, na escala de centímetros, o termo fratura é utilizado em geral.

10.1.2 Tipos de Falhas

Uma falha divide a rocha em dois **blocos de falha**, o plano que separa os dois blocos é chamado de **plano de falha**. Para falhas com inclinação os dois blocos recebem nomes de acordo com a sua posição relativa ao plano de falha. O bloco acima do plano de falha é conhecido como **capa ou teto (hanging wall)** o bloco abaixo do plano de falha é a **lapa ou muro (footwall)**. Esses

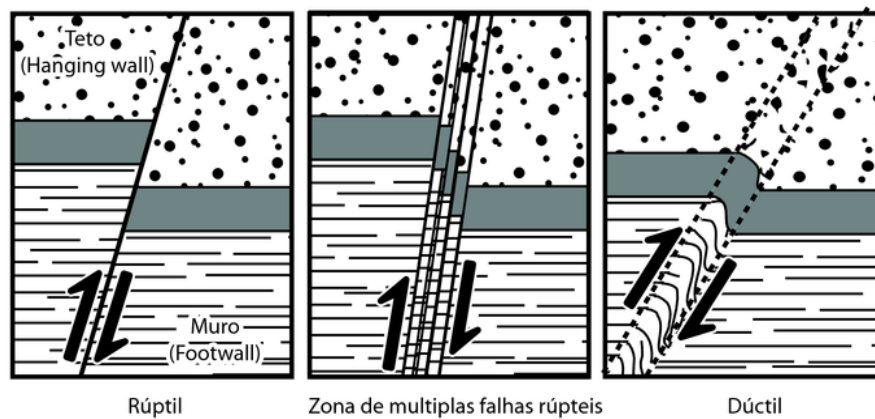


Figura 10.1: Tipos de falhas quanto a deformação do plano de falha.

elementos estão presentes na figura 10.2. Para falhas verticais essas distinções não se aplicam, e os blocos são classificados de acordo com a direção geográfica: bloco sul e bloco norte por exemplo.

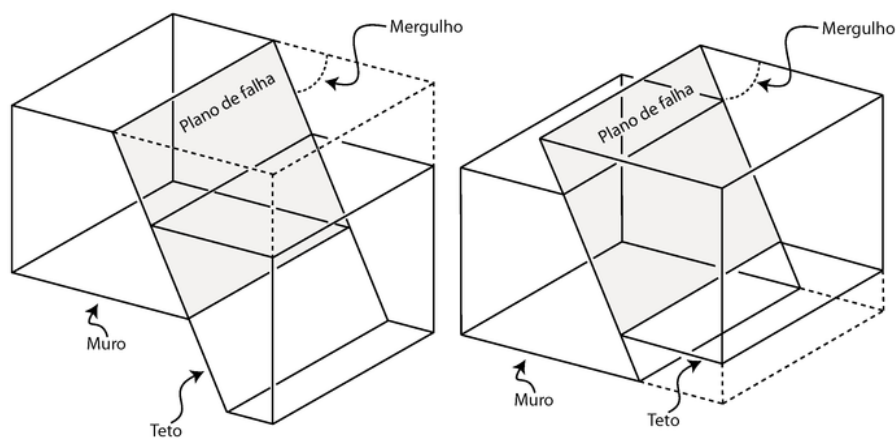


Figura 10.2: Elementos da geometria de uma falha.

O ângulo que o plano de falha faz com o plano horizontal é conhecido como **mergulho da falha (fault dip)**. Se o mergulho é maior que 45° dizemos que é uma falha com **alta inclinação** caso contrário trata-se de uma falha de **baixa inclinação**.

Nessa tese estaremos interessados em três tipos de falhas: falha reversa, falha normal e falha oblíqua. A geometria dessas falhas é mostrada na figura 10.3.

Falha normal

Falhas normais movem os blocos paralelamente ao plano de falha de modo que o teto (hanging wall) se mova para baixo em relação ao muro (footwall).

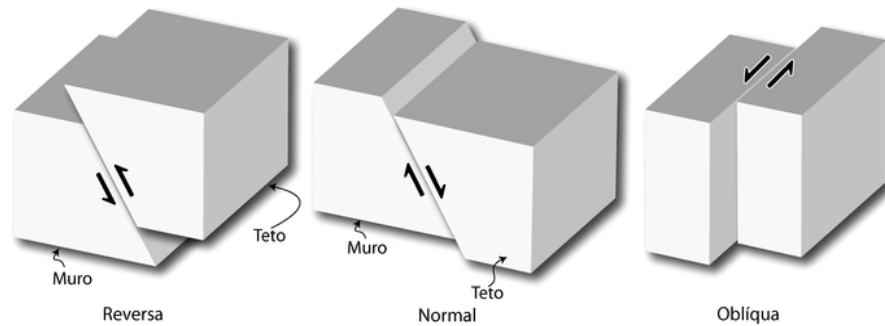


Figura 10.3: Tipos de falha de acordo com o movimento relativo entre os blocos.

A maioria dessas falhas apresenta um ângulo de mergulho de 60° , mas muitas apresentam baixos mergulhos sendo quase horizontais. Como resultado do teto movendo-se para baixo, falhas normais acomodam um movimento extensional da crosta terrestre.

Falha reversa

Falhas reversas são aquelas onde teto (hanging wall) se move para cima em relação ao muro (footwall). Geralmente colocando rochas mais antigas sobre rochas mais novas. Essas falhas acomodam um movimento convergente da crosta terrestre. Em sua maioria possuem mergulho com ângulo inferior a 45° .

Se o material da rocha for um pouco dúctil, esse tipo de falha está associado com dobras que acontecem próximos a falha de diferentes maneiras. Gostaríamos de dar ênfase a uma dessas maneiras, conhecida como **dobra de propagação de falha (fault propagation fold)**. A geometria dessa falha e dobra associada estão representados na figura 10.4.

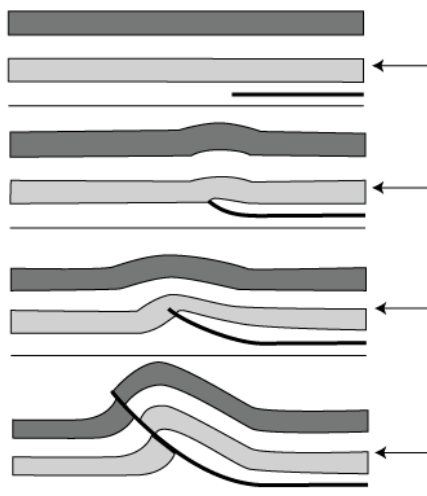


Figura 10.4: Etapas de formação de uma dobra de propagação de falha.

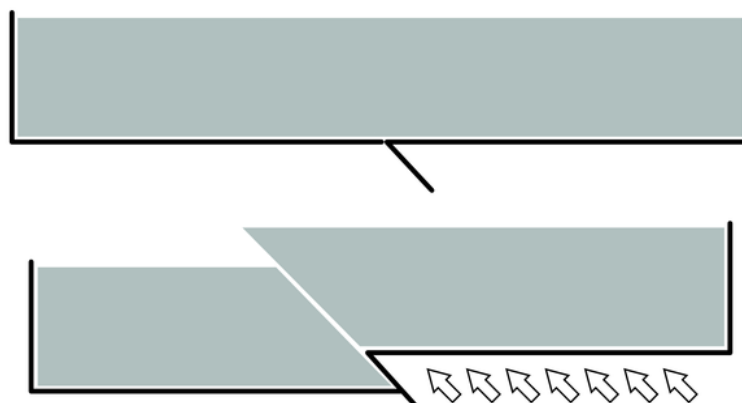


Figura 10.5: Geometria da simulação de falha reversa: A simulação é iniciada com uma caixa preenchida com o material do GBPM, com o passar do tempo a parede de um dos lados da caixa se move para cima e para esquerda num ângulo de 45° empurrando o material e gerando um falhamento.

Vamos agora utilizar o GBPM para simular uma falha reversa. E em seguida comparar qualitativamente o resultado obtido com o da figura 10.4.

Utilizamos os seguintes parâmetros para descrever uma rocha dúctil.

Passo de tempo	10^{-5} s
Aceleração da gravidade	$1 \text{ m} / \text{s}^2$
#Partículas	15001
Densidade	$100 \text{ kg} / \text{m}^3$
Modelo de força normal	Grãos viscos-elásticos
Constante dissipativa A	0.7
Módulo de Young Y	10^5 Pa
Poisson ν	$1/3$
Modelo de força tangente	Modelo de Haff and Werner
Coefficiente de atrito de Coloumb μ	10^{-1}
Parâmetro de rugosidade tangente γ^t	10^{-1}
#Contatos	42792
Parâmetro elástico do contato \tilde{k}	10^4
Parâmetro de resistência do contato $\tilde{\sigma}$	0.5×10^3

A geometria da fronteira do modelo é aplicada de acordo com a figura 10.5. Essa figura mostra a seção transversal do modelo 3D. O lado esquerdo da caixa é modelado com partículas que permanecem estáticas. As partículas do bordo do lado direito da caixa se movem num ângulo de 45° graus, conforme indicado pelas setas, forçando o material a mover-se gerando a falha e a dobra associada.

Na figura 10.6 é apresentado o resultado da simulação. Temos duas

vistas da simulação, uma frontal e uma em perspectiva. Nessa simulação estão presentes todas as etapas da formação da falha e dobras associadas.

Para facilitar a visualização da geometria, tons de cinza são aplicados dando idéia de camadas. Esses tons de cinza são apenas um rótulo da partícula e não estão associados à mudança de propriedades físicas do modelo.

Em vermelho são exibidos os contatos que se partiram (fraturas). Na última imagem vemos que o comportamento do modelo é o esperado, e qualitativamente a simulação está de acordo com as primeiras etapas da figura 10.4, no que diz respeito as camadas inferiores da simulação.

10.1.3

Deformação granular homogênea

Nesse exemplo, vamos simular a intrusão de um material duro sob um material granular. É como se estivéssemos empurrando uma rocha sob uma areia. Nesse caso o material granular não fratura, mas se acomoda sobre a rocha intrusiva. Vamos verificar a deformação que acontece no material granular.

Parâmetros

A tabela seguinte mostra os parâmetros que foram aplicados nessa simulação. Como estamos simulando um material granular, não vamos adicionar nenhum contato geométrico ao modelo.

Passo de tempo	10^{-3} s
#Partículas	17269
Densidade	2500 kg / m ³
Modelo de força normal	Grãos viscos-elásticos
Constante dissipativa A	0.5
Módulo de Young Y	10^7 Pa
Poisson ν	1/3
Modelo de força tangente	Modelo de Haff and Werner
Coefficiente de atrito de Coloumb μ	10^{-1}
Parâmetro de rugosidade tangente γ^t	10^{-1}
#Contatos	0
Frames por segundo FPS	1.59 (Pentium D 3.0 GHz, 3GB RAM)

Geometria

Para efetuar a simulação é necessário definir a geometria da condição de fronteira. Nesse exemplo, a geometria é modelada de acordo com a figura

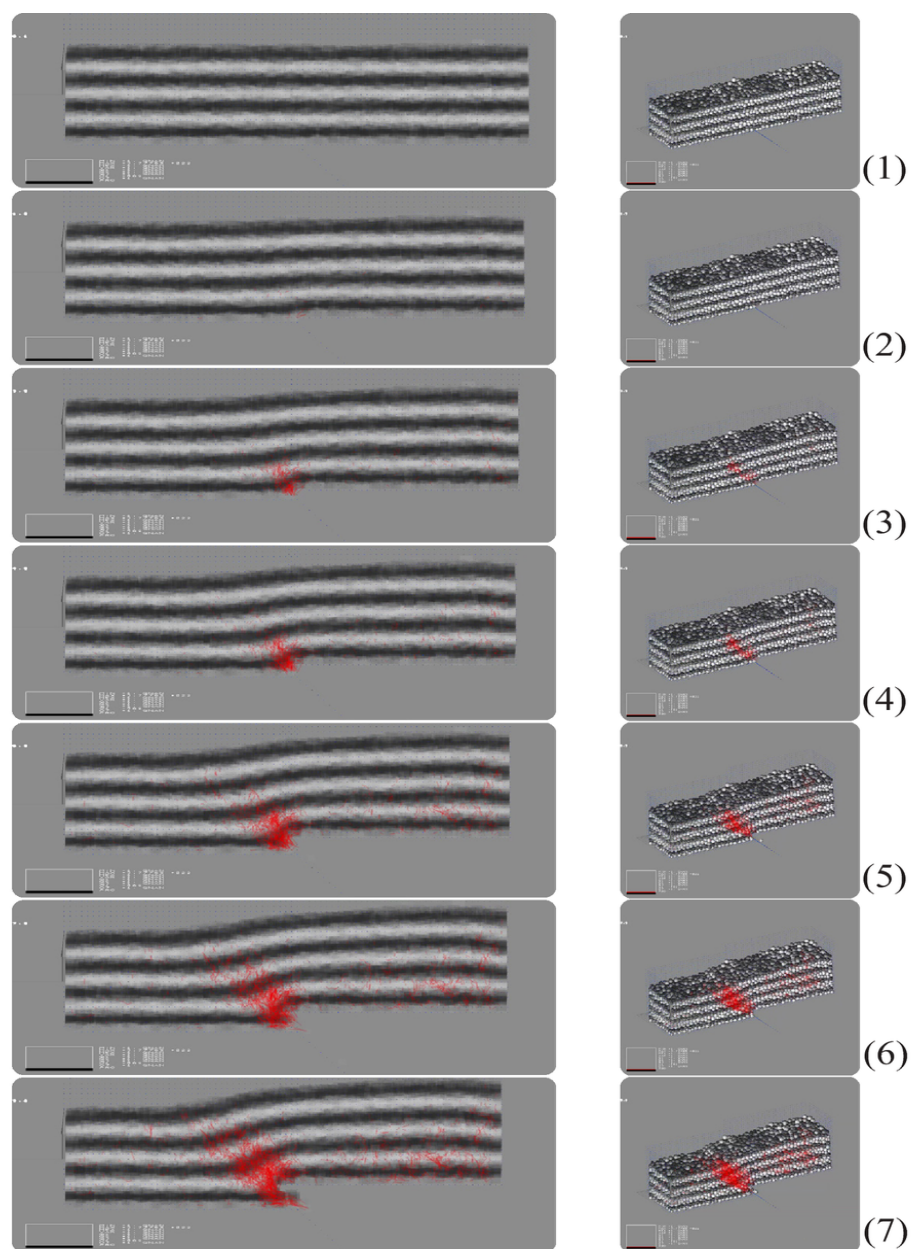


Figura 10.6: Resultado da simulação de falha reversa. Temos duas vistas da simulação, uma frontal e uma em perspectiva. Nessa simulação estão presentes todas as etapas da formação da falha e dobras associadas. Para facilitar a visualização da geometria, tons de cinza são aplicados dando a noção de camadas. Esses tons de cinza são apenas um rótulo da partícula e não estão ligados a mudança de propriedades físicas do modelo. Em vermelho estão os contatos partidos.

10.7. Essa imagem mostra uma seção transversal do modelo 3D: Uma rampa de material extremamante duro é empurrada sob o material granular.

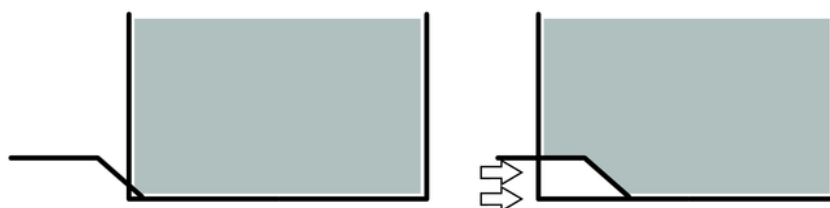


Figura 10.7: Geometria da simulação: A rampa é empurrada sob o material granular e as paredes da caixa são estáticas.

Nessa simulação não foi empregado um modelo de contatos, isso é, estamos simulando um material puramente granular.

Resultado da simulação

Na figura 10.8 é exibido o resultado da simulação. As camadas são deformadas de maneira coerente. Como estamos utilizando um material puramente granular não aparecem falhas (no contexto de modelo) pois o material é de natureza totalmente granular.

Cada quadro representa um tempo diferente na simulação. Os números que aparecem próximos as imagens mostram a ordem em que as figuras foram capturadas.

As camadas, inicialmente, possuem uma geometria perfeitamente horizontal (quadro 1). Lentamente o material começa a penetrar sob o material, e a deformação é acomodada somente nas camadas inferiores (quadro 2). Na sequência (quadro 4 em diante) temos uma deformação contínua das camadas que vão se acomodando sobre a rampa.

10.1.4 Deformação heterogênea

Nesse exemplo, a geometria é a mesma do caso anterior, a diferença está no fato de que, na camada intermediária do modelo foi aplicado o modelo de contatos, como é observado na figura 10.9. Esse exemplo mostra a capacidade do método de modelar, num mesmo problema, dois tipos completamente de comportamentos: As camadas superiores e inferiores são compostas de um material que se comporta como areia, e a camada intermediária se comporta como um material visco-elástico. Esse material força uma continuidade maior durante a deformação, forçando uma deformação mais local.

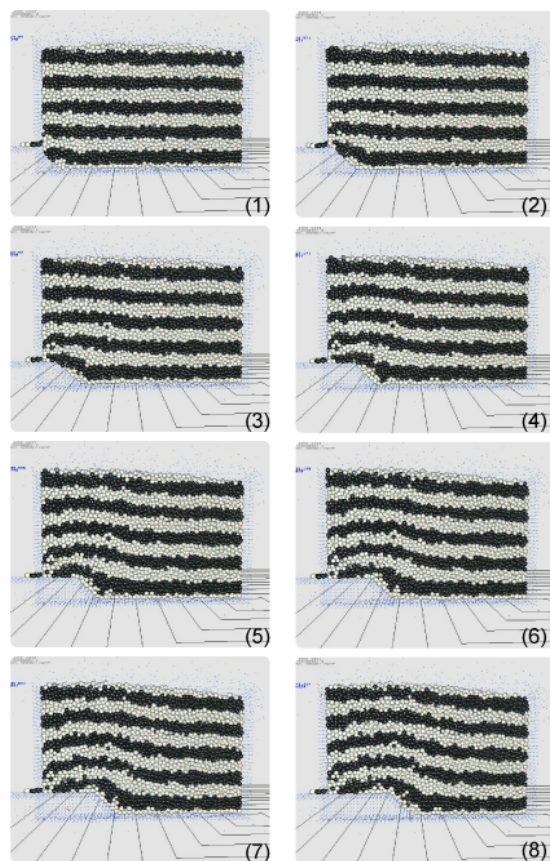


Figura 10.8: As camadas deformam-se de maneira coerente. Nesse caso não aparecem falhas pois o material é de natureza totalmente granular. Cada frame representa um tempo diferente na simulação. Os números que aparecem próximos as imagens mostram a ordem em que as figuras foram capturadas.

Parâmetros

A tabela seguinte mostra os parâmetros que foram aplicados nessa simulação.

Passo de tempo	10^{-3} s
#Partículas	5951
Densidade	2500 kg / m ³
Modelo de força normal	Grãos viscos-elásticos
Constante dissipativa A	0.4
Módulo de Young Y	10^7 Pa
Poisson ν	1/3
Modelo de força tangente	Modelo de Haff and Werner
Coefficiente de atrito de Coloumb μ	10^{-1}
Parâmetro de rugosidade tangente γ^t	10^{-1}
#Contatos	3781
Frames por segundo FPS	5.14571 (Pentium D 3.0 GHz, 3GB RAM)

Geometria

Novamente vamos definir a geometria da condição de fronteira. Nesse exemplo utilizamos quase a mesma geometria da simulação anterior a diferença está na camada central de material, que agora deixa de ser de natureza totalmente granular.

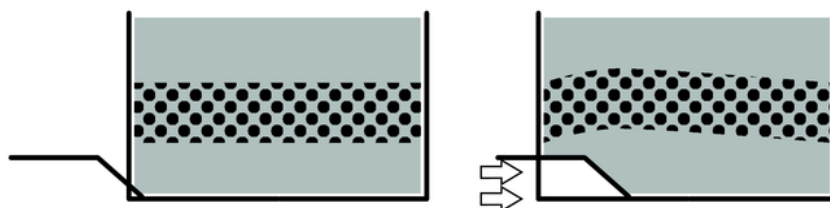


Figura 10.9: Geometria da simulação: A rampa é empurrada sob o material granular e as paredes da caixa são estáticas. A camada do meio é modelada com a formulação utilizando os contatos NP.

Resultado

Na figura 10.10 está o resultado da simulação. As camadas são deformadas de maneira mais suave devido a ação da camada central. Nesse caso não aparecem falhas, pois o material da camada intermediária foi configurado de forma a não permitir fraturas.

A figura 10.10 apresenta alguns passos de tempo da simulação com duas imagens. A da esquerda: mostra os contatos usando cores, em vermelho estão os contatos mais deformados. A imagem da direita mostra os contatos com tons de cinza, quanto mais claro maior a força exercida pelo contato.

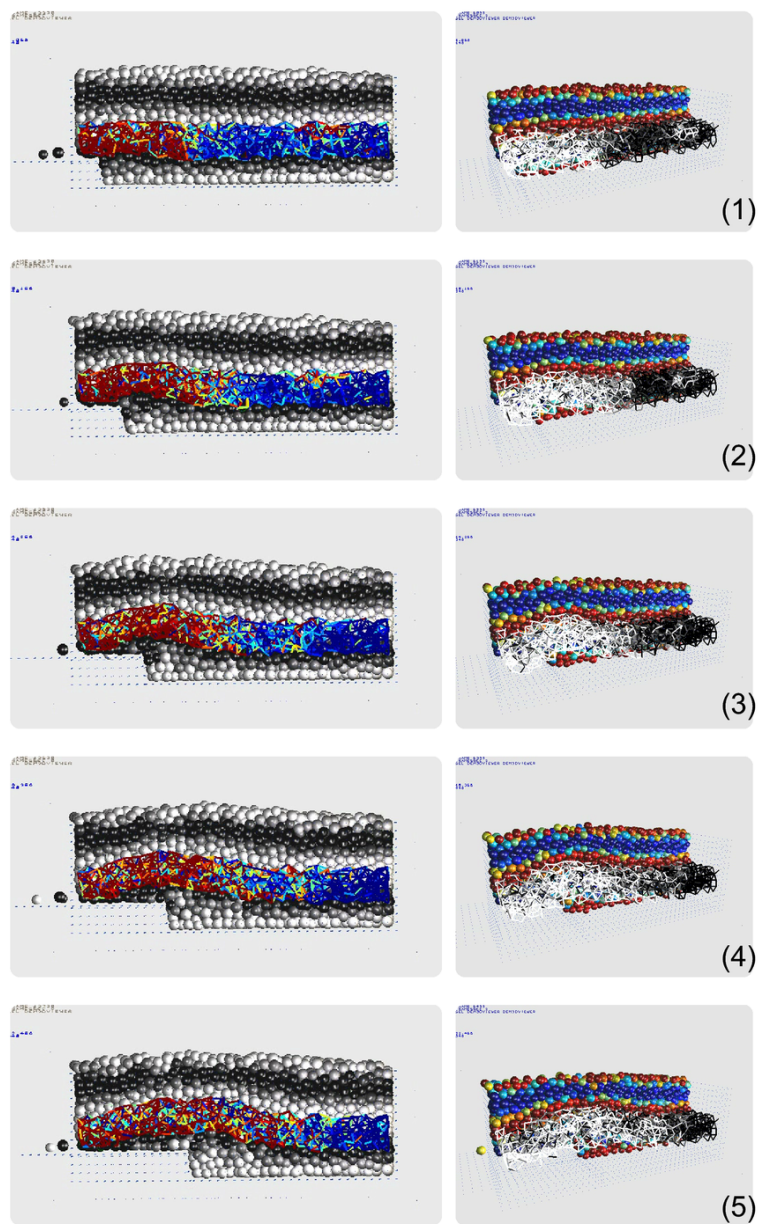


Figura 10.10: Cada frame da simulação é mostrado com duas imagens. Imagem esquerda: contatos NP usando cores, em vermelho estão os contatos mais deformados. Imagem à direita: contatos NP usando tons de cinza, quanto mais claro maior a força exercida pelo contato.

Esse exemplo é interessante pois mostra a capacidade do modelo de lidar com diferentes tipos de material, nesse caso temos três tipos, uma rocha muito dura que está sendo empurrada (rampa). Um material totalmente granular (areia) e um material visco-elástico que pode fraturar.

10.2

Aplicações em Computação Gráfica

10.2.1

Deformação 2D

Nesse exemplo, a geometria simulada é uma região retangular do plano, onde a base da região é rotacionada mais de meia volta, forçando uma deformação extrema do material.

Para gerar o modelo, 310 partículas foram distribuídas regularmente, sobre uma área retangular, e fixadas lado a lado empregando os contatos. O lado superior do retângulo é fixo, e o lado inferior é rotacionado, no sentido horário, num ângulo maior que 90 graus.

Esse é um exemplo de deformação extrema, e o método lida com ele de forma eficaz, veja a figura 10.11.

Usando as “*Thin Plate Splines*”, descritas na seção 6.5, um mapeamento contínuo da deformação é construído, esse mapa, exibe uma boa qualidade de deformação: não possui auto interseção, nem descontinuidades, e localmente é quase conforme. Isso é, os quadrados no mapa xadrez permanecem quase ortogonais.

A qualidade do mapeamento implica em um bom mapeamento de textura, o que abre diversas aplicações em computação gráfica.

Deformação 2D devido a efeitos externos

Na figura 10.12 está o resultado de uma simulação, o modelo da cauda do gato sendo empurrada por um objeto externo. Ela é composta por 210 partículas que estão presas devido aos contatos geométricos.

A geometria desse caso é mais complexa quando comparada ao exemplo anterior. Uma pequena massa, mostrada na figura 10.12, força o modelo da cauda do gato, gerando deformação.

Posteriormente, quando a bola azul deixa de interagir com o modelo, a cauda retorna para a posição inicial.

O movimento é interpolado usando as TPSs, e o resultado do mapeamento é exibido na figura 10.12.

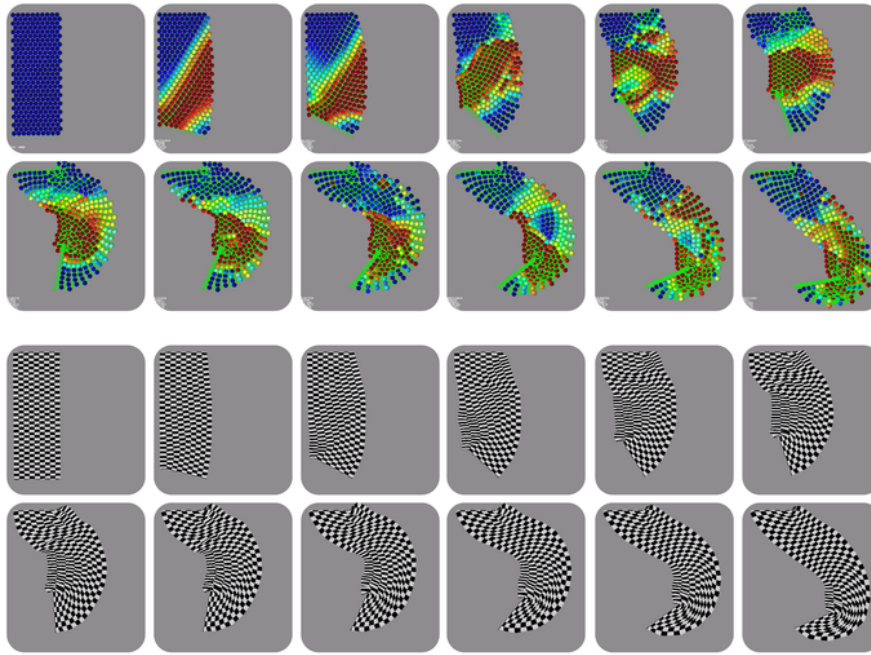


Figura 10.11: Deformação de textura 2D. Rotação do lado inferior de ângulo maior que 90° . Topo: modelo de simulação, as cores mapeiam as velocidades dos grãos, em vermelho os mais rápidos. Base: Mapeamento da textura.

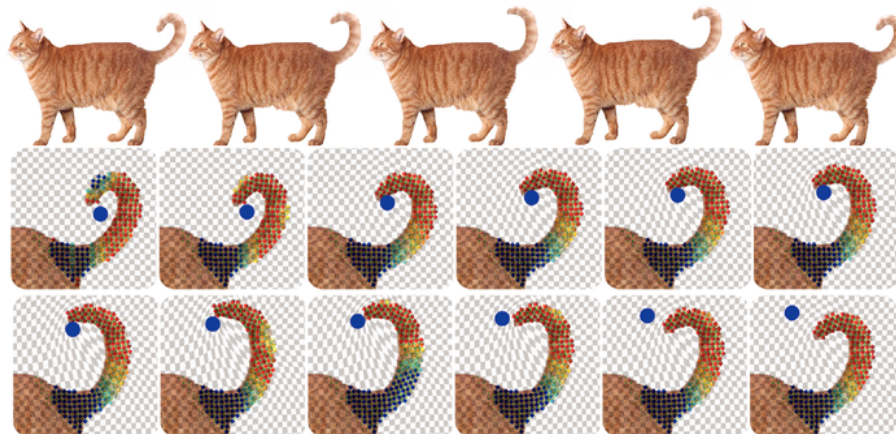


Figura 10.12: Simulação da cauda do gato sendo empurrada pela bola destacada em azul. Primeira linha: Resultado aplicado sobre o modelo original. Segunda e terceira linhas: Detalhe do modelo utilizado para executar a simulação.

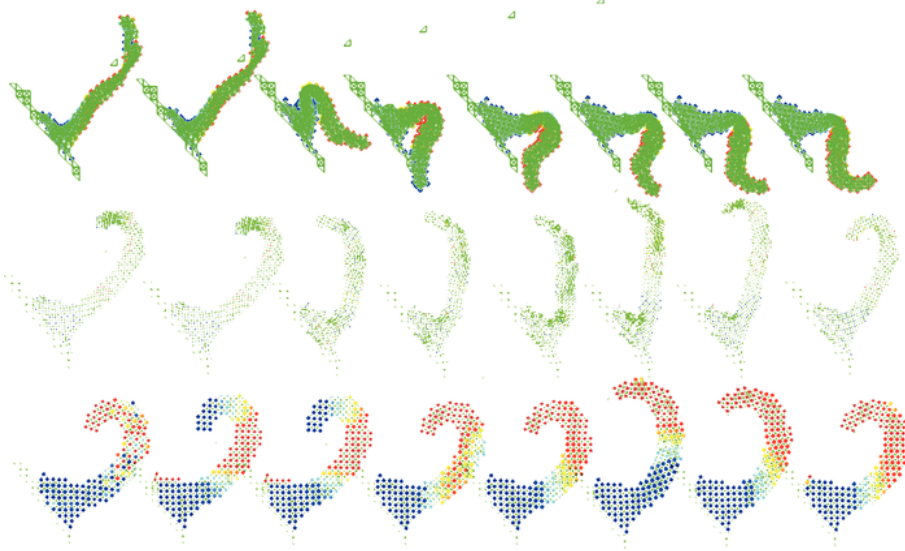


Figura 10.13: Comparação entre os modelos de simulação. Primeira linha: somente massa mola. Segunda linha: massa mola pontual em conjunto com o DEM. Terceira linha: modelo completo.

10.2.2 Comparação

Para ilustrar cada etapa da modelagem, três modelos foram comparados: o primeiro utiliza somente um sistema massa mola, o segundo utiliza o DEM e um modelo de contato que atua sobre os centros das esferas, e o terceiro modelo possui a formulação completa do GBPM.

Essa comparação, serve para exemplificar cada componente da parte física do modelo. Os contatos geométricos preservam a continuidade da forma, enquanto o modelo de contato partícula-partícula evita sobreposições e compressões indesejadas. Ele também exemplifica a contribuição de cada parte do modelo: as molas conferem elasticidade ao modelo enquanto o a parte análoga ao DEM mantém a plasticidade.

10.2.3 Heterogeneidades e fraturas

Modelar heterogeneidades com o modelo proposto é uma tarefa fácil, pois é possível configurar os parâmetros dos contatos individualmente de forma arbitrária mais elástica podem ser modeladas mudando o valor da constante elástica dos contatos. Esse processo só é limitado pela resolução do modelo.

A modelagem também permite a simulação fraturas, veja figura 10.14. O parâmetro que controla a resistência do contato também pode ser definido individualmente para cada contato, permitindo definir partes mais ou menos

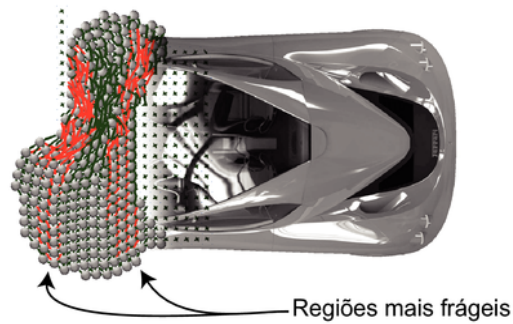


Figura 10.14: Fraturas geradas devido à heterogeneidade do material. Os contatos quebrados, em vermelho, aparecem na porção mais frágil do modelo.

resistentes.

Na figura 10.15, o resultado da simulação de uma colisão é exibido. Essa simulação é composta por 428 partículas, com uma distribuição de parâmetros heterogênea.

O capô do carro é dividido em quatro regiões, sendo a da frente mais mole, a segunda mais dura, a terceira tão mole quanto a primeira e uma quarta camada extremamente dura.

A simulação respeita a heterogeneidade do modelo: primeiro gerando a forma de um acordeom, e depois, fraturando o modelo.