

4 Resultados

4.1 Simulações

Nesta Seção vamos apresentar os resultados¹ obtidos das nossas simulações, apresentando as diferentes circunstâncias e usos para os quais o modelo matemático se adequa. Os resultados encontrados se mostraram dentro do escopo dos nossos objetivos: fraturas e deformações naturais e de qualidade, em tempo real para os objetos de geometria mais simples.

Como os resultados são apresentados junto aos parâmetros utilizados para obter os comportamentos dos objetos simulados, resumimos o significado de cada um dos parâmetros:

- Chamado de *coeficiente de restituição*, o coeficiente α corresponde à força com a qual o objeto restitui sua forma. A força interna de restituição de objetos com $\alpha = 1$ sempre posiciona os vértices em suas posições ideais, fazendo com que eles se comportem como um corpo rígido. Objetos com $\alpha = 0$ não possuem nenhuma força de restituição de forma, logo, agem como um sistema com partículas livres.
- β corresponde à tolerância do objeto a efeitos de deformação como achatamento e alongamento (nos modos de deformação linear e quadrático) e flexão (somente no quadrático). Objetos com $\beta = 0$ não apresentam nenhum desses efeitos.
- O *coeficiente de ruptura* σ controla a variação máxima que a distância original entre os agrupamentos pode atingir sem que eles se desconectem. Basta uma pequena alteração na distância original entre agrupamentos cujas conexões apresentem σ próximo de 1 para que eles se rompam, enquanto que conexões cujo σ é maior que 3 permitem aos agrupamentos do objeto se distanciarem ou aproximarem sem que se desconectem.
- Quanto mais próximo de 1 for o *coeficiente de distribuição global dos pesos* δ , que modula a consistência interna do objeto, menor é a influência local dos agrupamentos sobre os vértices do objeto. Objetos com δ próximos a 1 descartam de tamanha forma a influência local dos agrupamentos nos pesos dos vértices que se comportam como um objeto de

¹O computador utilizado para a obtenção de todos os resultados apresentados nessa Parte possui um processador Intel Core i5 2.8 GHz. Sua placa gráfica é uma GeForce GTX 550 Ti.

um agrupamento apenas, com relação ao modelo de deformação. Objetos cujo δ está próximo de 0, contudo, comportam-se como se somente a influência local importasse: nesse sentido, comportam-se como tecidos.

4.1.1

Bolas de Plástico

Utilizamos o modelo “Bola de Plástico”² (578 vértices) para ilustrar os conceitos mais básicos do método. Para as simulações abaixo, as bolas de plástico foram subdivididas em 10 a 15 agrupamentos de vértices. A fim de simular bolas de plástico feitas a partir de um material que seja quebrável entretanto aceite quantidades de deformação antes de se partir, utilizamos o modo de deformação linear, o coeficiente de restituição $\alpha = 0,8$ e a tolerância a deformações $\beta = 0,7$. Quanto as configurações de fratura, definimos para cada bola de plástico uma distribuição global dos pesos $\delta = 0,5$ e diferentes valores do coeficiente de ruptura σ , variando de 1,015 até 1,15, para que as bolas apresentem comportamentos ligeiramente diferentes. Na Figura 4.1, ilustramos o andamento da simulação com 5 objetos simultaneamente. Essa simulação foi executada a 40 FPS.

Para o modelo “Bola de Plástico”, assim como para os outros modelos, obtivemos diferentes padrões de fratura através tanto de variações na contagem de agrupamentos como na escolha das primitivas de aproximação. A Figura 4.2 mostra em detalhes o efeito da variação do número de segmentos na determinação do agrupamentos de vértices do objeto simulado: cada um dos agrupamentos é representado com uma cor. Para a obtenção de segmentos como os da Figura 4.1, ou seja, cacos resultantes da fratura da bola de plástico, utilizamos apenas o plano como primitiva de aproximação.

Podemos utilizar também o modelo “Bola de Plástico”, posicionado em repouso sobre uma superfície, para demonstrar o efeito da aplicação de uma força que a pressiona contra a superfície até que a deformação seja suficiente para causar ao objeto fraturas. A Figura 4.3 mostra o que acontece nesse tipo de simulação. A colisão com o cubo (nesse caso, controlado manualmente para efeito de demonstração) deforma o objeto até que as condição de fratura entre os agrupamentos sejam atingidas (Quadro 3).

²O modelo “Bola de Plástico” foi cedido por Nano Studio.

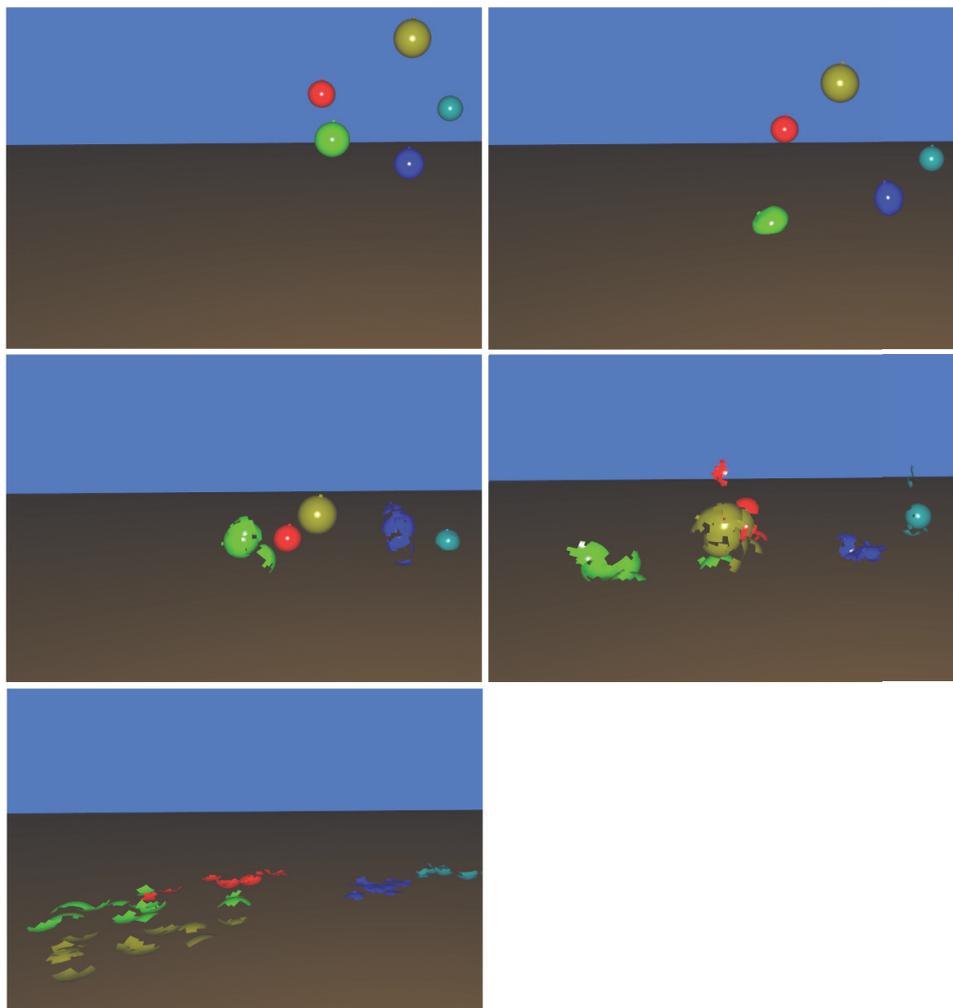


Figura 4.1: Simulação de 5 objetos baseados no modelo “Bola de Plástico”, cada uma possuindo entre 10 e 15 agrupamentos, $\alpha = 0,8$, $\beta = 0,7$ e σ entre 1,015 e 1,15.

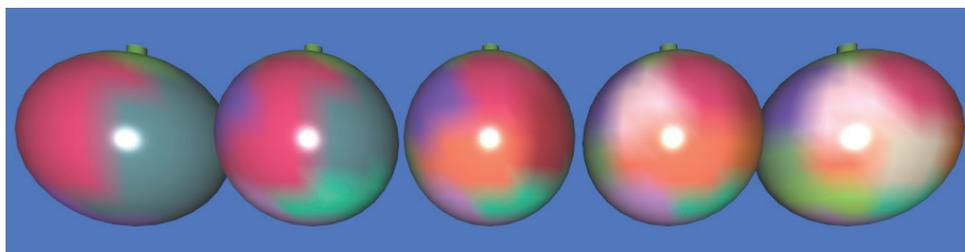


Figura 4.2: Podemos obter diferentes padrões de fratura para um mesmo objeto bastando variar o número de agrupamentos de segmentação. As bolas possuem, da esquerda para a direita, 5, 10, 15, 20, e 25 agrupamentos.

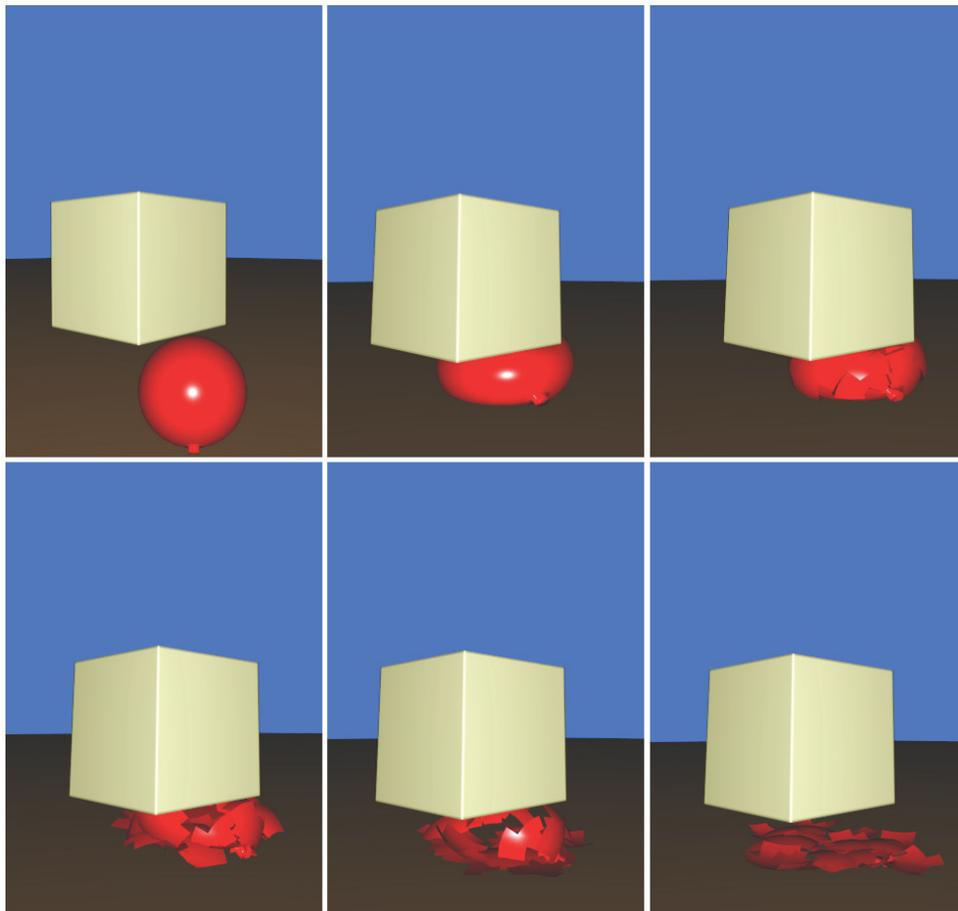


Figura 4.3: O modelo “Bola de Plástico”, ao ser pressionado contra a superfície onde se encontra, sofre deformação suficiente para que frature.

4.1.2

Jarro e Vaso

Utilizamos dois modelos diferentes para nossas simulações de objetos de cerâmica, “Jarro”³ e “Vaso”⁴. O modelo “Jarro” possui 11.074 vértices enquanto que testamos a implementação com duas diferentes versões do modelo, uma *simple*s contendo 1.710 vértices e uma *detalhada* contendo 8.833 vértices. Em nossas simulações, assumimos que os dois objetos são constituídos essencialmente do mesmo material no que diz respeito a suas configurações tanto de deformação como de fratura: como esses objetos são rígidos e não tolerantes a deformações de escala, parametrizamos seu coeficiente de restituição $\alpha = 1$, sua tolerância a deformações $\beta = 0$ e, assim como no objeto “Bola de Plástico”, utilizamos o modo de deformação linear. Para evitar que os agrupamentos possam obter muita distância entre si e que o objeto

³O modelo “Jarro” foi adquirido do repositório Oyonale (<http://www.oyonale.com/>).

⁴O modelo “Vaso” é cortesia de Nano Studio.

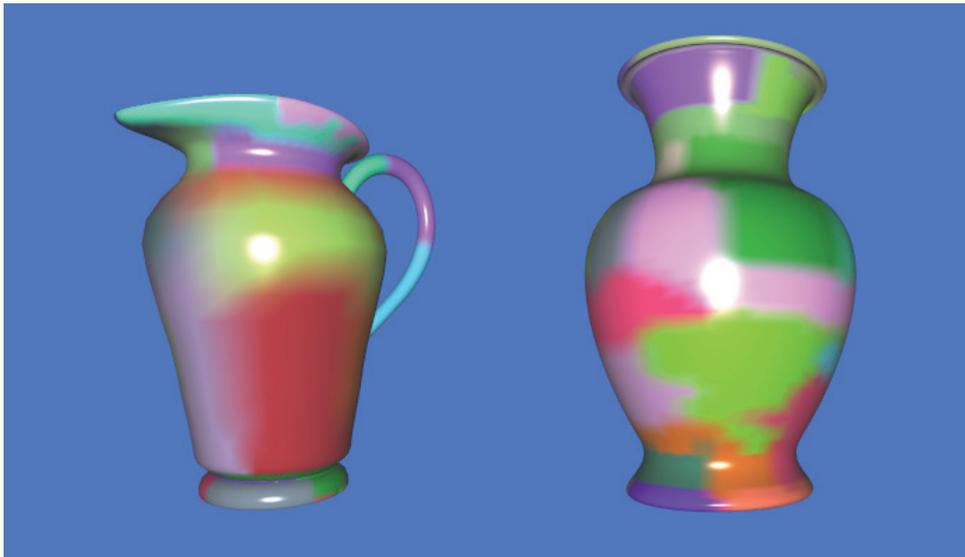


Figura 4.4: Modelo “Jarro” e modelo “Vaso” sendo segmentados em 25 e 35 partes, respectivamente, utilizando como primitivas apenas Cilindros.

possua uma consistência interna grande, conectamos os agrupamentos usando como coeficiente de ruptura $\sigma = 1,05$ e realizamos a distribuição global do pesos através de $\delta = 0,8$.

Vamos primeiro apresentar os resultados encontrados a partir do algoritmo de segmentação aplicado a esses objetos. Na Figuras 4.4 e 4.5, as partes produzidas pelo algoritmo de segmentação são apresentadas em cores distintas.

Na Figura 4.5 mostramos uma comparação entre o resultado da segmentação em 25 partes do modelo “Jarro” utilizando diferentes conjuntos de primitivas. O jarro da esquerda foi segmentado usando-se somente cilindros, enquanto que o jarro da direita usou todas as formas (Planos, Esferas e Cilindros). Observando o detalhe da asa do jarro, podemos notar que o algoritmo, através da maior variedade de formas disponíveis, segmenta a asa do jarro da direita em mais partes do que o da esquerda. Essas partes, contudo, representam segmentos menos naturais da asa do jarro, a qual é melhor aproximada por Cilindros do que por Esferas e Planos. Escolher utilizar apenas cilindros, dessa forma, gera segmentos mais naturais do objeto. Como o conjunto total de primitivas não é grande, e em geral a própria forma do objeto induz quais primitivas aproximam suas partes, essa configuração permite obtermos maior qualidade em nossas segmentações.

Em nossas simulações, obtivemos resultados similares para os dois objetos. Na Figura 4.6, mostramos a execução da simulação do modelo “Jarro”, o qual foi executado a 9 FPS. Na Figura 4.7, mostramos uma comparação entre o resultado da fratura para os modelos *detalhados* (o quadro superior da



Figura 4.5: Comparação entre os resultados da segmentação do modelo “Jarro” em 25 partes. O jarro da esquerda foi segmentado usando-se somente Cilindros, enquanto que o jarro da direita usou todas as formas (Planos, Esferas e Cilindros).

imagem) e *simplificados* do modelo “Vaso”, cujas simulações foram executadas, respectivamente, a 8 FPS e 35 FPS. Apesar da simulação *simplificada* ter sido executada com um ganho considerável de desempenho, é possível reparar no impacto causado na qualidade dos padrões de fratura por utilizar modelos com menos vértices, em especial no caco que se destaca à esquerda nos dois quadros.

4.1.3 Bexiga

O modelo “Bexiga”⁵ (1.549 vértices) mostra o quão bem a implementação trata objetos que possuem uma tolerância maior a deformações, como objetos feitos de borracha. Para tal sua execução, segmentamos o modelo em 3 agrupamentos (a segmentação pode ser vista na Figura 4.8), utilizando a Esfera como primitiva de aproximação: essas escolhas foram realizadas a fim de segmentar de forma adequada um modelo que é aproximadamente esférico e, em geral, ao estourar, subdivide-se em poucas partes.

Parametrizamos seus coeficientes de deformação de forma a obter um objeto bem deformável: configuramos seu coeficiente de restituição $\alpha = 0,6$, sua tolerância a deformações $\beta = 0,8$, o que faz com que o objeto seja suscetível a grandes mudanças de escala, e utilizamos o modo de deformação quadrático, o que confere aos agrupamentos de vértice do objeto o potencial para torções e dobras, como ilustrado na Figura 4.9. Para fazer também com que o objeto

⁵O modelo “Bexiga” foi cedido por Nano Studio.

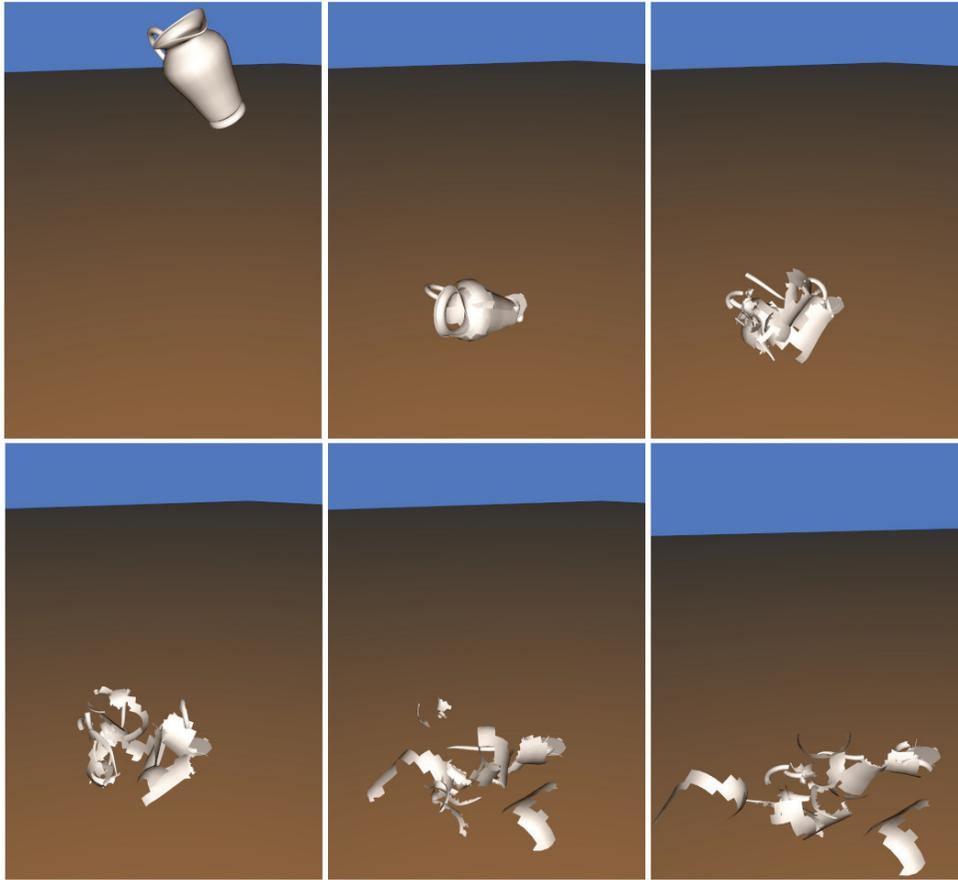


Figura 4.6: Execução da simulação do modelo “Jarro”, segmentado em 25 agrupamentos.

permita-se esticar com maior elasticidade, utilizamos um coeficiente de ruptura de $\sigma = 2,25$. Como desejamos que ao objeto seja conferida grande consistência entre os agrupamentos, ou seja, que seu modelo de deformação o trate como se essencialmente tivesse um agrupamento apenas, definimos a distribuição global dos pesos $\delta = 0,98$.

A simulação do objeto “Bexiga” trouxe uma nova consideração para as simulações executadas. No estado inicial da simulação, esse objeto já se encontra deformado: sua superfície se apresenta dilatada em função da pressão exercida pelo ar em seu conteúdo. Quando ocorre um rasgo na superfície desse objeto, contudo, esse ar escapa, fazendo com que o objeto retorne a sua forma original e não dilatada. Para conseguirmos tal efeito, tratamos esse objeto como tendo duas formas em repouso: uma para quando ele ainda não apresenta rasgos, dilatada, e outra para quando ele apresenta. Essas formas possuem uma correspondência dos vértices um para um. Ao detectarmos que ocorreu uma fratura no objeto, substituímos os vértices do vetor de posições originais das posições dilatadas para as não dilatadas, recalculando as variáveis pré-

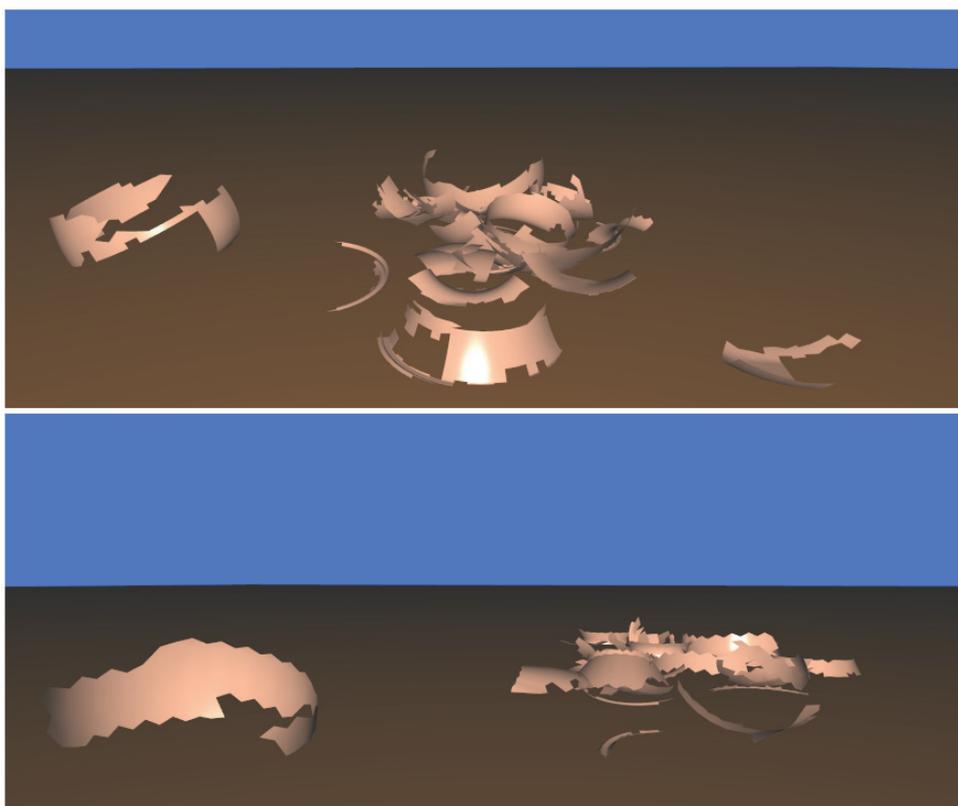


Figura 4.7: Comparação entre os padrões de fratura gerados a partir de dois modelos diferentes (*simples* no quadro inferior) do objeto “Vaso”.

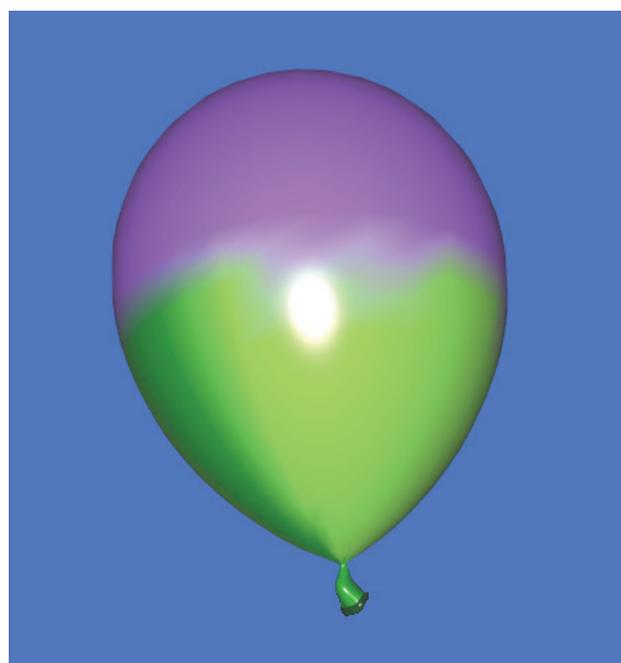


Figura 4.8: Modelo “Bexiga” segmentado em 3 partes utilizando a primitiva Esfera.

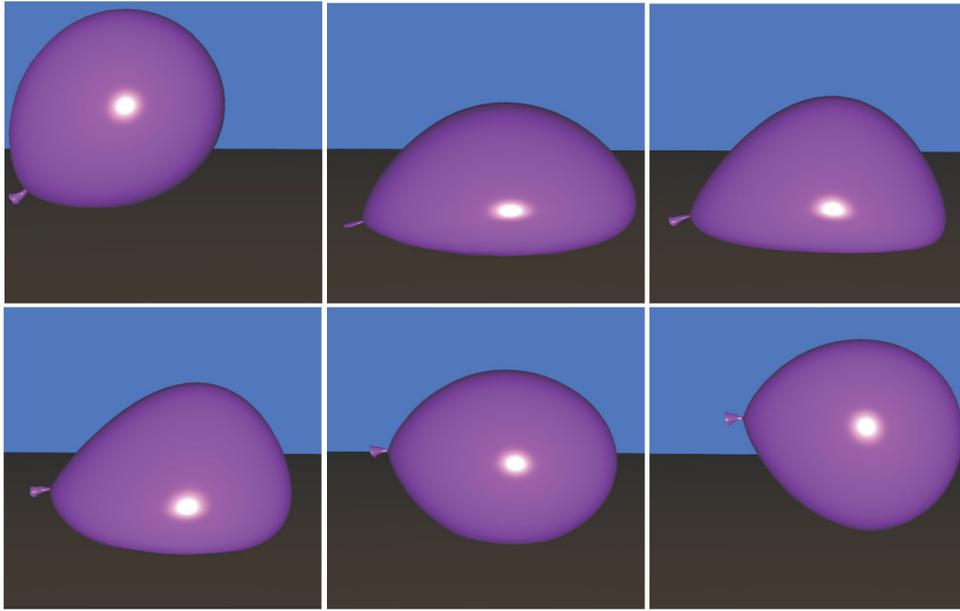


Figura 4.9: Suscetibilidade do modelo “Bexiga” a deformações, principalmente causada pelo uso do modo de deformação quadrático. Nessa imagem, o objeto é pressionado contra a mesa por uma pressão aplicada sobre ele.

calculadas na inicialização dos agrupamentos. Isso faz com que, após a fratura, os agrupamentos de vértices do objeto retornem a forma não dilatada, pois as posições ideais são calculadas a partir das posições originais. Os resultados dessa simulação podem ser vistos nas Figuras 4.10 e 4.11. A simulação com o objeto “Bexiga” foi executada a 57 FPS.

4.1.4 Janela

Com o modelo “Janela”, o qual pode ser visto na Figura 4.12, simulamos um objeto fraturável plano, preso a um requadro por suas arestas e absolutamente intolerante a deformações. Utilizamos duas diferentes versões do modelo “Janela”: a versão *simples* possui 1.089 vértices; a versão *detalhada*, 4.225. Para obter as propriedades descritas acima, parametrizamos o objeto da seguinte forma: quanto aos coeficientes de restituição e deformação α e β , escolhemos para o objeto a configuração que o deixa o mais próximo de um objeto de corpo rígido possível, ou seja, $\alpha = 1$, $\beta = 0$ e modo de deformação linear. Por ser um objeto feito de vidro, não queremos permitir que exista distanciamento entre os pedaços do objeto sem que haja fratura, logo determinamos um coeficiente de ruptura $\sigma = 1,047$ e o coeficiente de distribuição global dos pesos $\delta = 0,99$.

Para realizarmos a segmentação do modelo “Janela”, poderíamos ter es-

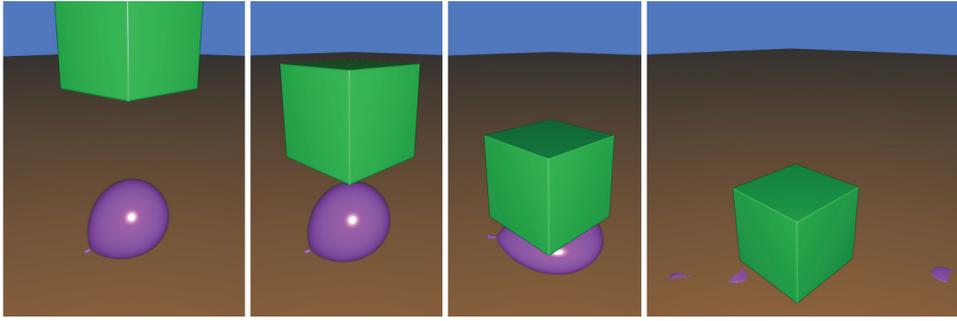


Figura 4.10: O objeto “Bexiga” rasgando (em função de ser pressionado contra uma superfície por outro objeto controlado manualmente) e retornando a sua forma não dilatada (vazia) após o estouro.

colhido como primitiva de aproximação o Plano, pois nem a Esfera nem o Cilindro aproximam adequadamente nenhuma parte de um objeto planar. Contudo, como todos os vértices do objeto se encontram em um plano, quaisquer combinações de vértices adjacentes aproximam um plano. Isso acarreta em uma segmentação na qual as partes segmentadas não correspondem naturalmente a segmentos adequados. A fim de obter segmentos os quais correspondam de forma mais adequada aos cacos resultantes da fratura de uma janela de vidro, desenvolvemos para esse modelo um método alternativo de segmentação. Nosso método alternativo segmenta o plano de forma radial e semialeatória, a semialeatoriedade sendo introduzida no intuito de se obter ruídos para as bordas dos segmentos. Uma comparação dos resultados obtidos pode ser visto na Figura 4.13.

Nossa simulação consiste de uma bola sendo arremessada contra a janela. Em resposta ao contato com a bola, os vértices da superfície do objeto são deslocados, provocando distância entre os centro dos agrupamentos e conseqüentemente fraturas entre eles. A simulação utilizando a versão simples do objeto foi executada a 50 FPS, enquanto que a versão detalhada atingiu uma média de 18 FPS. A Figura 4.14 exhibe quadros de momentos dessa simulação.

Utilizamos também o modelo “Janela” em um experimento no qual empregamos diferentes conjuntos de parâmetros, com o objetivo de alterar a resposta física desse objeto com relação a sua deformação e fraturas e testar a flexibilidade da implementação. Ao utilizar um diferente conjunto de parâmetros (coeficiente de restituição $\alpha = 0,2$, coeficiente de ruptura $\sigma = 4,5$ e distribuição global dos pesos $\delta = 0,1$) obtemos um comportamento amplamente diferente: o modelo que representava uma janela de vidro passa a simular um objeto que se assemelha a uma película elástica. O resultado pode ser encontrado na Figura 4.15.

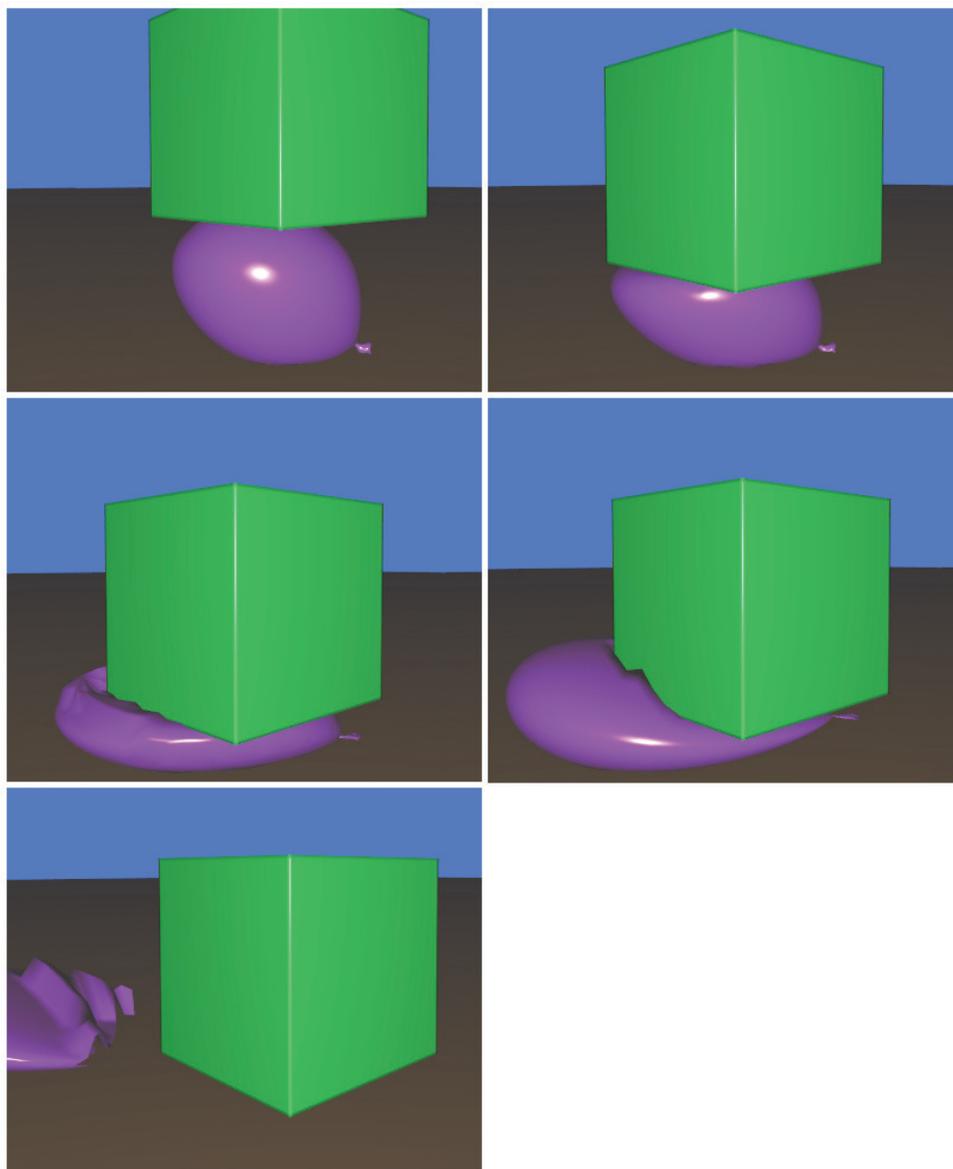


Figura 4.11: Detalhe do estouro do objeto “Bexiga” (o qual ocorre no quinto Quadro).



Figura 4.12: O objeto “Janela”.

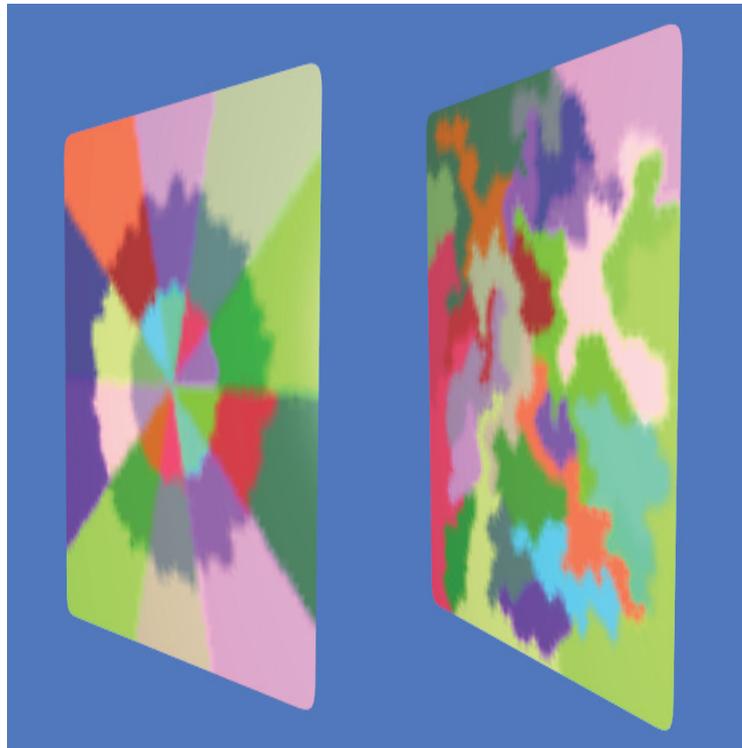


Figura 4.13: Comparação entre segmentação do objeto “Janela” (sem o requadro) obtida através do algoritmo de aproximação de primitivas (à direita) e do método procedural desenvolvido nessa Seção (à esquerda).

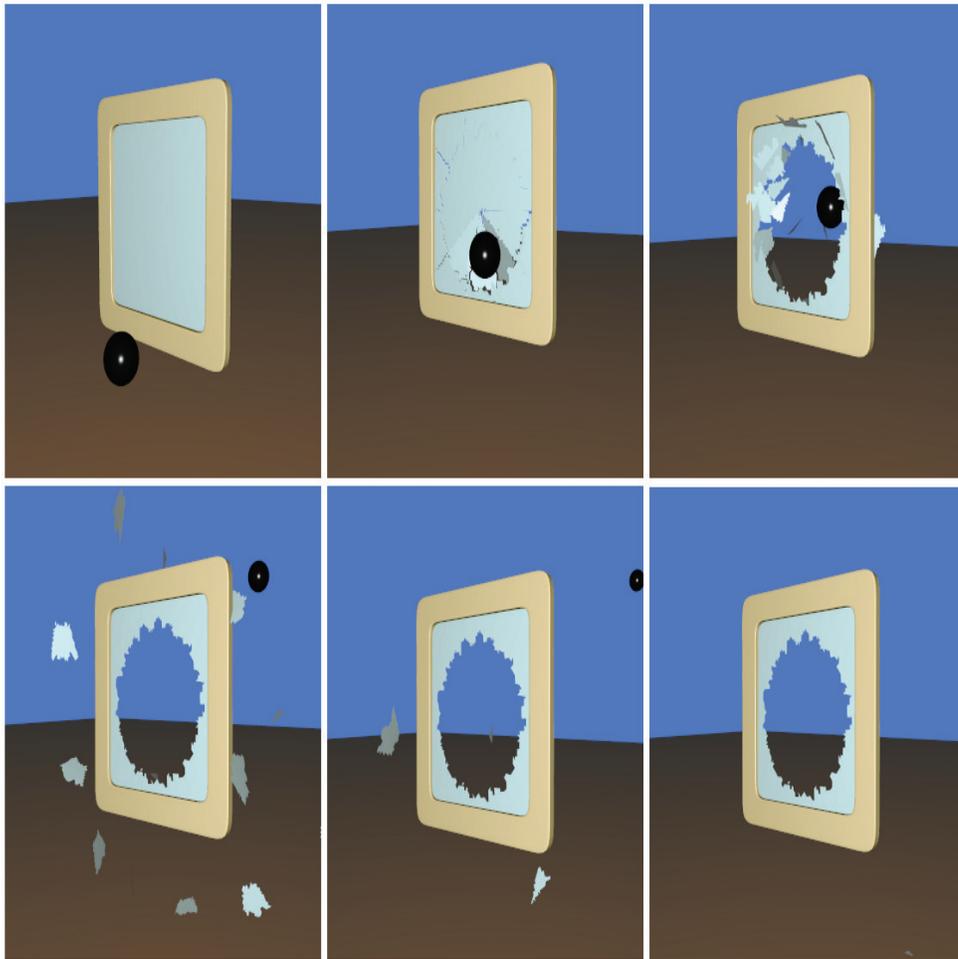


Figura 4.14: Simulação do objeto “Janela”, fraturando ao contato com uma bola arremessada.

4.2 Desempenho

4.2.1 Segmentação

Nossa análise de desempenho do pré-processamento consiste em contabilizar o tempo de execução necessário para que o método de segmentação das malhas e inicialização do objeto termine. A inicialização do objeto consiste do uso dos agrupamentos de faces encontrados na fase de segmentação para o cálculo dos pesos dos vértices e inicialização dos agrupamentos (considerando, necessariamente, as operações de pré-cálculo executadas). Foram consideradas suficientes quatro malhas diferentes, cada uma representando uma das ordens de grandeza das malhas 3D, com relação ao seu número de vértices. Nossos testes foram executados considerando também números de agrupamentos di-

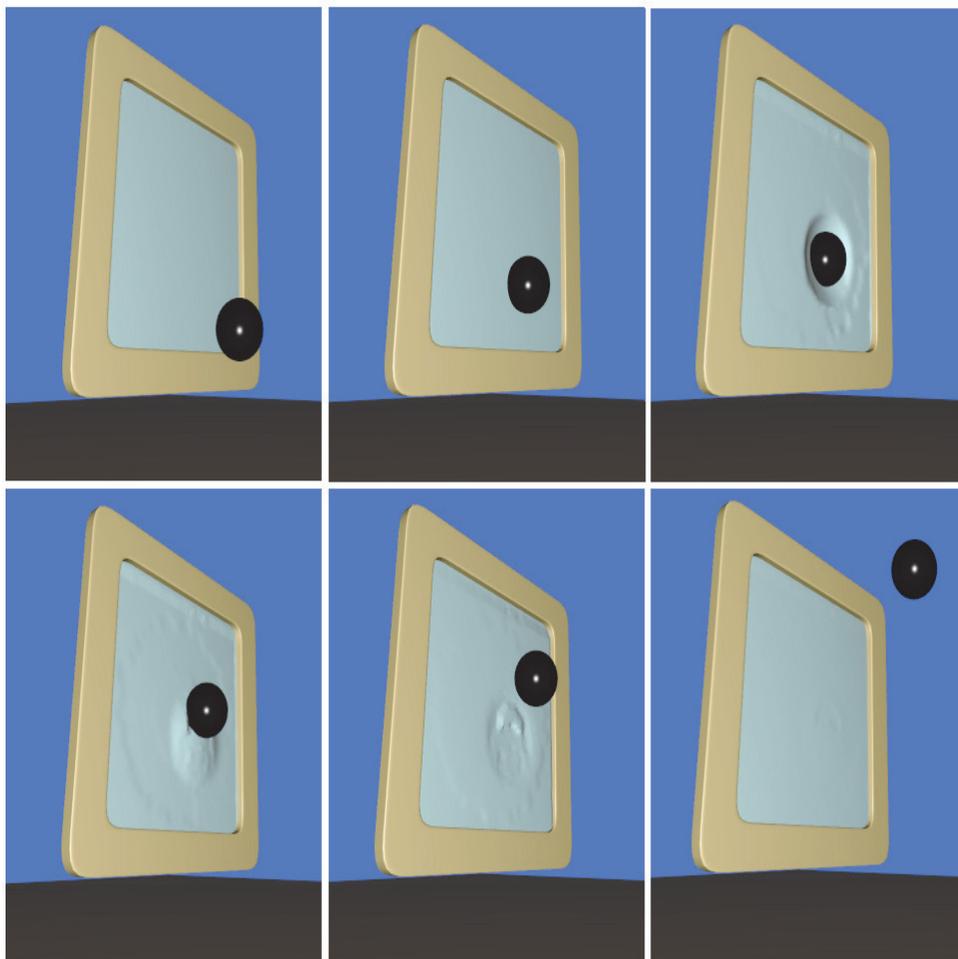


Figura 4.15: Objeto “Janela” configurado de forma a reagir como se fosse um objeto elástico.

ferentes em cada execução: testamos com 5, 10, 15, 20 e 30 agrupamentos. Para todos os testes, foram usadas as três primitivas de aproximação as quais integram a implementação: Plano, Esfera e Cilindro.

Os resultados de nossos testes de tempo de execução se encontram na Tabela 4.1. Além dessa avaliação, mensuramos o percentual desse tempo o qual corresponde à execução do método de segmentação, ou seja, a determinação dos triângulos os quais originalmente demarcam os agrupamentos. Esses dados se encontram na Tabela 4.2.

Pode-se dizer que o tempo de pré-processamento das malhas não parece ser diretamente influenciado pelo número de agrupamentos estipulados para um objeto. Realizando comparações entre as malhas em si, pode-se detectar uma relação direta entre seus números de vértices e seu tempo de pré-processamento. Se levarmos em conta o número de vértices dessas malhas, analisando o tempo médio gasto para serem pré-processadas, tem-se um valor

Malha	Vert.	5 Agr.	10 Agr.	15 Agr.	20 Agr.	30 Agr.
Bola de Plástico	578	0,76	0,61	0,68	0,62	0,54
Vaso (<i>simples</i>)	1.710	1,31	1,40	1,40	1,35	1,36
Janela (<i>detalhada</i>)	4.225	1,80	1,65	1,73	1,81	1,80
Jarro	11.074	11,84	12,69	13,90	13,52	13,70

Tabela 4.1: Tempo de execução médio das duas fases do pré-processamento dos objetos simulados, em segundos.

Malha	5 Agr.	10 Agr.	15 Agr.	20 Agr.	30 Agr.
Bola de Plástico	23%	27%	24%	25%	26%
Vaso (<i>simples</i>)	58%	57%	55%	56%	55%
Janela (<i>detalhada</i>)	53%	49%	48%	46%	47%
Jarro	88%	86%	86%	86%	84%

Tabela 4.2: Percentual do tempo de pré-processamento o qual decorre do algoritmo de segmentação. Nota-se também que, junto com um crescimento no número de vértices da malha importada, cresce o percentual do tempo de execução durante o qual é realizada a segmentação dessa malha. A média de tempo tomada pela segmentação foi de 52%.

que corresponde a 0,871ms por vértice.

4.2.2 Simulação

A Tabela 4.3 apresenta o desempenho da implementação para os diferentes objetos simulados, de acordo com os valores da Seção 4.1. Esses dados nos permitem extrair mais informações a respeito da implementação. Em cada uma das simulações, processávamos um número N de objetos, cada um deles com V vértices e C agrupamentos. Para distribuições globais dos pesos $\delta > 0$, cada um dos agrupamentos possui todos os vértices da malha, graças a influência global do objeto. Logo, podemos assumir que o número total de vértices sendo simulado T pode ser escrito como:

$$T = NVC. \quad (4-1)$$

Utilizamos esses valores de T para calcular uma relação entre o desempenho da implementação com relação ao número total de vértices sendo processados. Essa relação pode ser encontrada na Figura 4.16, o qual evidencia que a função $\frac{T}{FPS}$ é aproximadamente linear.

Objeto	Vértices	Agrupamentos	FPS
Bolas de Plástico (5 objetos)	578 (p/ obj.)	10 a 15 (p/ obj)	40
Vaso (<i>simples</i>)	1.710	35	35
Vaso (<i>detalhado</i>)	8.833	35	8
Jarro	11.074	25	9
Bexiga	1.549	3	57
Janela	1.089	30	50
Janela (<i>detalhada</i>)	4.225	30	18

Tabela 4.3: Desempenho em FPS obtida a partir das simulações executadas

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1012674/CA

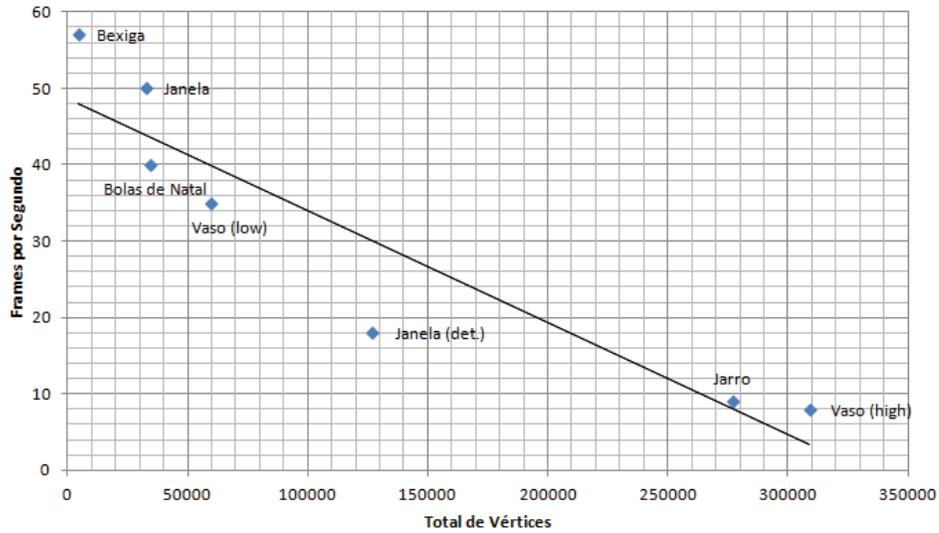


Figura 4.16: Gráfico o qual relaciona o desempenho da simulação pelo número total de vértices sendo simulados.