



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
PROCESSOS EM TECNOLOGIA QUÍMICA**

**ESTUDO DE PROCESSO DE RECICLAGEM DO
COMPOSTO DE POLIETILENO E ALUMÍNIO
PROVENIENTE DE EMBALAGENS CARTONADAS
ASSÉPTICAS ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL USANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)**

EDY MAICON MERENDINO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química na área de concentração Processos em Tecnologia Química.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Nunhez

**CAMPINAS – SÃO PAULO
2011**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

M541e Merendino, Edy Maicon
Estudo de processo de reciclagem do composto de polietileno e alumínio proveniente de embalagens cartonadas assépticas através de simulação computacional usando o método dos elementos discretos (DEM): M541e / Edy Maicon Merendino. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: José Roberto Nunhez.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Reciclagem - Indústria. 2. Simulação por processos. 3. Plástico - Reciclagem. 4. Metais - Reaproveitamento. 5. Dinâmica - Simulação por computador. I. Nunhez, José Roberto. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Study of recycling process for polyethylene / aluminum compound by computer simulation using discrete element method (DEM):

Palavras-chave em Inglês: Recycling - Industry, Simulation processes, Plastic - Recycling, Metals - Reuse, Dynamics - Computer simulation

Área de concentração: Processos em Tecnologia Química

Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Adriana Siviero Pagani Lovón , Fernando Luiz Neves

Data da defesa: 06-12-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

Folha de aprovação

Dissertação de Mestrado defendida por **Edy Maicon Merendino** e aprovada em 06 de Dezembro de 2011 pela banca examinadora constituída pelos doutores:


Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO NUNHEZ


Dra. ADRIANA SIVIERO PAGANI LOVÓN


Dr. FERNANDO LUIZ NEVES

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE/DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO EDY MAICON MERENDINO, E ORIENTADA PELO PROF.DR. JOSÉ ROBERTO NUNHEZ


Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO NUNHEZ

CAMPINAS, 2011

Dedico esta dissertação à minha esposa *Eneida* pelo amor e apoio incondicional em cada momento da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiro a Deus, por todas as bênçãos recebidas e pela fortaleza nos momentos difíceis.

Aos meus pais, Etere e Maria Isabel, por seu amor, dedicação e esforço para minha formação. Não poderia ter melhores exemplos. Saibam que cada passo meu é uma vitória de vocês.

À minha esposa Eneida, que com muito amor e compreensão acompanhou e incentivou todo este trabalho e a quem tenho como exemplo de paixão e dedicação ao estudo.

À Tetra Pak Ltda., nas pessoas de Fernando von Zuben e Paulo Nigro, pelo incentivo ao meu desenvolvimento pessoal e profissional e pelo investimento no desenvolvimento de processos e tecnologias de reciclagem para embalagens cartonadas assépticas estando, assim, na vanguarda da área ambiental. Sintam-se também contemplados neste meu muito obrigado todos vocês, amigos da Tetra Pak, que fazem (ou fizeram) parte deste continuo trabalho por um mundo mais sustentável.

A Luiz Antonio Mathias, responsável pelo desenvolvimento de grande parte dos processos envolvidos neste trabalho. Conhecimento e criatividade não carecem nem de títulos, e nem diplomas.

Ao meu orientador José Roberto Nunhez pela amizade, conselhos e comentários sempre pertinentes ao longo deste trabalho.

A Nicolas Spogis e a empresa ESSS pelo direcionamento e suporte no desenvolvimento deste trabalho. Também a Daniel Nasato pelo importante auxílio com a implementação do método e com o uso do EDEM®.

A Fábio Antunes, por ter aberto as portas de sua empresa Formatho Ideal e disposto do seu tempo para a realização de importantes testes para a elaboração deste trabalho.

Aos colegas do L-CFD, pelos bons momentos, boas conversas e ótimos cafés enquanto os computadores processavam todas as simulações.

“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé
sobre ombros de gigantes.”

Isaac Newton

RESUMO

As embalagens cartonadas assépticas para alimentos são comuns em nosso dia-a-dia. Tais embalagens são compostas por três materiais: papel, polietileno de baixa densidade e alumínio. Seu processo de reciclagem se dá em duas etapas sucessivas: a reciclagem do papel e a posterior reciclagem do composto de polietileno e alumínio. Durante a primeira etapa de reciclagem, um percentual das fibras de papel não é retirado do composto de polietileno e alumínio o que pode comprometer a qualidade de produtos feitos a partir da reciclagem deste composto.

Para a extração do papel residual foi desenvolvido de maneira empírica um equipamento centrífugo em escala industrial. Visando o estudo do funcionamento deste equipamento fez-se a simulação deste usando o método dos elementos discretos (DEM).

O primeiro passo foi a determinação de parâmetros físicos e de interação através de experimentos práticos e respectivas simulações computacionais para a calibração de um modelo, o qual foi conseguido de maneira satisfatória.

Uma vez tendo o modelo calibrado, foram realizadas simulações com diferentes geometrias para o rotor e parte estática deste equipamento buscando levantar hipóteses para o entendimento do funcionamento do equipamento. Os resultados para diferentes especificações foram comparados e discutidos.

Palavras-chave: método dos elementos discretos (DEM), reciclagem, reciclagem de plástico, embalagem cartonada asséptica, simulação computacional.

ABSTRACT

Milk and beverages carton packages are very common in our lives. These packages are made of three different materials: paper, low density polyethylene and aluminium. The recycling process of these packages takes place in two successive stages: the recycling of paper and the subsequent recycling of polyethylene and aluminium composite. During the first stage of recycling a percentage of the paper is not removed from the composite of polyethylene and aluminium which can compromise the quality of products made from recycling of this composite.

An industrial-scale centrifuge equipment was developed empirically for extraction of residual paper. In order to study the operation of this equipment, it was made its simulation using the discrete element method (DEM).

The first step was set-up of physical and interaction parameters through practical experiments and computer simulations to calibrate a model, which was achieved satisfactorily.

Once the model was calibrated, simulations were performed with different geometries for rotor and static body of this equipment seeking hypotheses in order to understand equipment operation. The results for different specifications were compared and discussed.

Key-words: Discrete element method (DEM), recycling, plastic recycling, aseptic carton packages, computational simulation.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ix
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
SUMÁRIO	xvii
LISTA DE FIGURAS	xxi
LISTA DE TABELAS	xxv
I – INTRODUÇÃO	1
1. Objetivo	3
2. Justificativa	4
II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3. A reciclagem de embalagens cartonadas assépticas	7
3.1 – A embalagem cartonada asséptica	7
3.2 – O fluxo do processo de reciclagem no Brasil	8
3.2.1 – Disposição como resíduo sólido urbano	9
3.2.2 – Descarte como material reciclável	13
3.3 – Viabilidade ambiental dos processos de reciclagem	22
3.4 – Viabilidade econômica dos processos de reciclagem	22
3.5 – A reciclagem de embalagens assépticas no mundo	23
3.6 – A reciclagem de embalagens assépticas no Brasil	23
4. Método dos elementos discretos (DEM)	27
4.1 – Introdução	27
4.2 – Histórico	27
4.3 – Equações governantes	30
4.4 – Modelo para forças de contato	31
4.5 – Software EDEM®	32
4.5.1 – Modelos de contato no EDEM®	33
5. Propriedades mecânicas dos materiais	38
5.1 – Módulos de Elasticidade	38
5.2 – Coeficiente de Poisson	39
5.3 – Módulo de Cisalhamento ou de Rigidez	40
6. Propriedades dinâmicas dos materiais	41
6.1 – Coeficiente de restituição	41

6.2 – Coeficiente de atrito estático.....	41
6.3 – Coeficiente de atrito dinâmico	41
6.4 – Coeficiente de atrito de rolamento	42
III – AJUSTE DO MODELO	43
7. O Processo	45
7.1 – Introdução	45
7.2 – O Composto PE/Al	45
7.3 – Equipamento lavador centrífugo em batelada.....	46
7.4 – Benefícios do processo de lavagem do composto PE/Al.....	47
8. O modelo DEM.....	48
8.1 – Introdução	48
8.2 – Modelo da partícula	48
8.3 – Geometria do lavador.....	49
8.4 – Modelos de contato	50
8.5 – Propriedades físicas e interações	50
8.6 – Propriedades físicas do aço carbono	52
8.7 – Propriedades físicas do composto PE/Al	52
8.7.1 – Massa específica	52
8.7.2 – Módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson	53
8.8 – Propriedades de interação entre os materiais	55
8.8.1 – Coeficiente de restituição.....	55
8.8.2 – Coeficiente de atrito estático e dinâmico	55
8.8.3 – Coeficiente de atrito de rolamento	57
8.9 – Ajuste da massa específica do composto PE/Al e do raio da partícula	63
8.9.1 - Dados experimentais.....	63
8.9.2 - Simulações de ajuste.....	65
IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
9. Aplicação do modelo DEM	75
9.1 – Introdução	75
9.2 – Parâmetros analisados	76
9.3 – Resultados	77
9.3.1 – Resultado gráfico das simulações	77
9.3.2 – Potência dissipada por colisões.....	87

9.3.3 – Torque médio no rotor	88
9.3.4 – Velocidade média das partículas.....	88
9.3.5 – Velocidade relativa média de colisão das partículas com a parte estática	89
9.3.6 – Número de colisões: Total e por tipo.....	90
9.3.7 – Distribuição da porcentagem de partículas por número de colisões.....	92
9.3.8 – Energia dissipada por 1000 colisões	95
9.4 – Análises.....	96
V – CONCLUSÃO	99
VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Estrutura das embalagens longa vida	7
Figura 3.2 – Corte transversal ilustrativo de uma embalagem cartonada asséptica mostrando as diferentes espessuras das suas diversas camadas.....	8
Figura 3.3 – Fluxograma de destino para embalagens cartonadas assépticas: Início.	8
Figura 3.4 – Fluxograma de destino para embalagens cartonadas assépticas: Disposição como resíduo urbano.....	9
Figura 3.5 – Vazadouro a céu aberto.	10
Figura 3.6 – Desenho ilustrativo de vazadouro a céu aberto.	10
Figura 3.7 – Aterro controlado na cidade de Resende/RJ.....	11
Figura 3.8 – Desenho esquemático de um aterro sanitário.	12
Figura 3.9 – Foto do aterro sanitário de Nova Iguaçu/ RJ.....	12
Figura 3.10 – Fluxograma de destino para embalagens cartonadas assépticas: Disposição como material reciclável.....	14
Figura 3.11 – Fluxograma de destino para embalagens cartonadas assépticas: Coleta seletiva e reciclagem das fibras de celulose.....	17
Figura 3.12 – a) Pellets do composto PE/Al b) Produtos fabricados a partir destes pellets	18
Figura 3.13 – a) Telha reciclada a partir do composto PE/Al b) Prensa para produção de telhas	19
Figura 3.14 – a) Tocha piloto de plasma b) Vista da unidade industrial que opera a tecnologia de reciclagem via plasma.	21
Figura 3.15 – Fluxograma de destino para embalagens cartonadas assépticas: Reciclagem do composto de polietileno e alumínio.	21
Figura 3.16 – Gráfico de evolução da taxa de reciclagem de embalagens cartonadas assépticas no Brasil	24
Figura 3.17 – Gráfico de evolução do preço médio pago pela tonelada de embalagens longa vida cartonadas assépticas pós-consumo no Brasil.....	25
Figura 4.1 – Publicações relacionados à simulação discreta de partículas ao longo dos últimos anos.	29
Figura 4.2 – Ilustração do esquema de forças atuando na partícula i através do contato com a partícula j e do não-contato com a partícula k (neste caso força de capilaridade). 31	
Figura 5.1 – Elongação axial na direção z (deformação positiva) e contração lateral nas direções x e y (deformações negativas) em resposta a uma tensão de tração. Linhas	

contínuas representam as dimensões após a aplicação da tensão; as tracejadas, antes dessa aplicação	39
Figura 5.2 – Esquema da deformação sofrida por um objeto devido a ação de uma tensão de cisalhamento.....	40
Figura 6.1 – Diagrama mostrando o par de forças que determina o torque de atrito, onde FN é a força de reação agindo sobre o objeto do plano e Fg é a componente normal do peso do objeto. O coeficiente de atrito de rolamento é o braço do par de forças. a) baixo atrito de rolamento; b) alto atrito de rolamento.	42
Figura 7.1 – Amostra do composto de PE/Al	45
Figura 7.2 – Lavador centrífugo - a) Visão geral do equipamento. b) Detalhe do rotor ..	46
Figura 8.1 – Geometria do equipamento lavador a) Parte estática b) Rotor.....	50
Figura 8.2 – Sistema de ensaio para determinação de massa específica aparente.....	52
Figura 8.3 – Descontinuidade da camada de alumínio da amostra do composto de PE/Al através de registro fotográfico com estereomicroscópio Olympus, operado com aumento de 18 vezes.....	53
Figura 8.4 – Gráfico de uma das corridas obtidas na máquina de ensaio Instron.....	56
Figura 8.5 – Comparação entre o resultado do experimento real e sua simulação usando um modelo DEM.....	59
Figura 8.6 – Gráfico do coeficiente de atrito de rolamento vs. Ângulo médio obtido para as simulações do modelo DEM.....	62
Figura 8.7 – Ilustração das tendências das respostas obtidas para as variáveis potência dissipada e torque para o primeiro planejamento de experimentos.	67
Figura 8.8 – Ilustração das tendências das respostas obtidas para as variáveis potência dissipada e torque para o segundo planejamento de experimentos.....	68
Figura 9.1 – Detalhes dos rotores estudados: a) Rotor 01; b) Rotor 02; c) Rotor 03; d) Rotor 04.	75
Figura 9.2 – Geometrias estudadas: a) Parte estática sem chicanas. b) Parte estática com chicanas.....	76
Figura 9.3 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 01 com a geometria da parte estática sem chicanas.....	78
Figura 9.4 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 01 com a geometria da parte estática com chicanas.	79
Figura 9.5 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 02 com a geometria da parte estática sem chicanas.....	80
Figura 9.6 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 02 com a geometria da parte estática com chicanas.	81

Figura 9.7 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 03 com a geometria da parte estática sem chicanas.....	82
Figura 9.8 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 03 com a geometria da parte estática com chicanas.	83
Figura 9.9 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 04 com a geometria da parte estática sem chicanas.....	84
Figura 9.10 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 04 com a geometria da parte estática com chicanas.	85
Figura 9.11 – Imagens da simulação dos Rotores 01, 02, 03 e 04 nas geometrias com e sem chicanas respectivamente, no instante $t=1,4$ segundo.	86
Figura 9.12 – Gráfico da potência dissipada por colisões para os diferentes rotores e geometrias.....	87
Figura 9.13 – Gráfico do torque médio para os diferentes rotores e geometrias.	88
Figura 9.14 – Gráfico da velocidade médias das partículas para os diferentes rotores e geometrias.	89
Figura 9.15 – Gráfico da velocidade relativa média de colisão entre partículas e a parte estática para os diferentes rotores e geometrias.	90
Figura 9.16 – Gráfico do número total de colisões para os diferentes rotores e geometrias.	91
Figura 9.17 – Gráfico da distribuição dos tipos de colisões para cada um dos rotores e das geometrias durante o período da simulação.	92
Figura 9.18 – Distribuição da porcentagem de partículas pelo número máximo de colisões com o terço inferior da parte estática durante 10 segundos para o Rotor 01.	93
Figura 9.19 – Distribuição da porcentagem de partículas pelo número máximo de colisões com o terço inferior da parte estática durante 10 segundos para o Rotor 02.	93
Figura 9.20 – Distribuição da porcentagem de partículas pelo número máximo de colisões com o terço inferior da parte estática durante 10 segundos para o Rotor 03.	94
Figura 9.21 – Distribuição da porcentagem de partículas pelo número máximo de colisões com o terço inferior da parte estática durante 10 segundos para o Rotor 04.	94
Figura 9.22 – Quantidade de energia dissipada pelos sistemas para cada 1000 colisões ocorridas.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Quantidade diária de resíduos sólidos, domiciliares e/ou públicos, coletados e/ou recebidos, por unidade de destino - Brasil - 2008.....	10
Tabela 4.1 – Artigos relacionados a temas de engenharia geotécnica	28
Tabela 4.2 – Artigos relacionados à simulação de processos industriais	29
Tabela 8.1 – Principais Dimensões físicas do lavador centrífugo	49
Tabela 8.2 – Parâmetros para implementação do modelo DEM : Propriedades físicas ...	51
Tabela 8.3 – Parâmetros para implementação do modelo DEM : Propriedades de interação entre os materiais.....	51
Tabela 8.4 – Valores obtidos para a massa específica real do composto de PE/Al.....	53
Tabela 8.5 – Determinação dos limites inferior e superior para o Módulo de Cisalhamento do composto PE/Al	54
Tabela 8.6 – Resultados para os coeficientes de atrito estático e dinâmico para cada face do material estudado.	57
Tabela 8.7 – Resultados obtidos com os testes físicos (valores dos ângulos em graus)..	60
Tabela 8.8 – Resultados obtidos na simulação com o coeficiente de atrito de rolamento (i) igual a 0,200 (valores dos ângulos em graus).	60
Tabela 8.9 – Resultados obtidos na simulação com o coeficiente de atrito de rolamento (i) igual a 0,225 (valores dos ângulos em graus).	60
Tabela 8.10 – Resultados obtidos na simulação com o coeficiente de atrito de rolamento (i) igual a 0,275 (valores dos ângulos em graus).	61
Tabela 8.11 – Resultados obtidos na simulação com o coeficiente de atrito de rolamento (i) igual a 0,300 (valores dos ângulos em graus).	61
Tabela 8.12 – Resultados obtidos na simulação com o coeficiente de atrito de rolamento (i) igual a 0,350 (valores dos ângulos em graus).	61
Tabela 8.13 – Parâmetros operacionais do lavador centrífugo: Gerais	64
Tabela 8.14 – Parâmetros operacionais do lavador centrífugo: Específicos	64
Tabela 8.15 – Primeiro planejamento de experimentos para massa específica e raio da partícula.....	65
Tabela 8.16 – Resultados do primeiro planejamento de experimentos para massa específica e raio da partícula.....	66
Tabela 8.17 – Segundo planejamento de experimentos para massa específica e raio da partícula.....	67
Tabela 8.18 – Resultados do segundo planejamento de experimentos para massa específica e raio da partícula.....	68

Tabela 8.19 – Resultados para massa específica igual a 500 kg/m ³ e raio da partícula igual a 0,01 m.....	69
Tabela 8.20 – Resultados do segundo planejamento de experimentos para massa específica e raio da partícula.....	71
Tabela 9.1 – Tabela da distribuição dos tipos de colisão para os diferentes rotores sem a presença de chicanas	91
Tabela 9.2– Tabela da distribuição dos tipos de colisão para os diferentes rotores sem a presença de chicanas	91

I – INTRODUÇÃO

A fascinação pelo movimento de fluidos e partículas sempre fez parte da humanidade desde seus antigos filósofos Heráclito e Aristóteles, passando pelos primeiros cientistas-pesquisadores Archimedes e Da Vinci, e tendo seus maiores expoentes nos gênios Newton e Einstein. No ar que respiramos, no sangue que nos mantém vivos, na água que chega até nossas casas, na fabricação de todos os produtos que consumimos e em inúmeras outras formas que podemos nem nos dar conta, estamos sempre, de forma direta e indireta, cercados e em contato com fluidos e partículas em movimento. E é com base na aplicação prática e no domínio do movimento, sejam eles de braços e pernas, pistões e engrenagens, elétrons e lasers, que a sociedade humana cresce e evolui.

Contudo em virtude deste crescimento e evolução da civilização humana os recursos naturais existentes no planeta estão sendo consumidos em uma velocidade muito maior do que o processo natural consegue recuperá-los gerando, assim, um desequilíbrio. A fauna, a flora, o ar, a água, os recursos naturais e suas interações entre si e com a própria humanidade têm sido alterados em virtude da ação desta sobre o ambiente em que vive.

Relatos dessa interação desequilibrada homem-ambiente têm sido apontados por cientistas mostrando seus efeitos, por exemplo, na concentração de gases de efeito estufa na atmosfera do nosso planeta que por consequência estão ocasionando o aumento da temperatura média do planeta que no longo prazo trará consequências desastrosas. Logo, o desenvolvimento sustentável, que proporcionará às gerações futuras os mesmos confortos que temos em nossa geração, deve ser buscado a todo custo.

É de um pouco de tudo isso que trata esta dissertação de mestrado. De como o conhecimento e o domínio sobre os movimentos podem contribuir para minimizar os impactos negativos que outros movimentos causaram. Uma aplicação prática de como a tecnologia, a ciência e o conhecimento podem contribuir na busca da humanidade pelo desenvolvimento sustentável.

1. Objetivo

Estudar o funcionamento de um equipamento centrífugo de lavagem do composto de polietileno e alumínio proveniente da primeira etapa do processo de reciclagem de embalagens cartonadas assépticas utilizando o método dos elementos discretos (DEM, do inglês *Discrete Element Method*) como ferramenta para simulação de sua operação na busca de hipóteses para o entendimento de seu funcionamento.

2. Justificativa

O composto de polietileno e alumínio resulta da primeira etapa do processo de reciclagem de embalagens cartonadas assépticas. No passado seu destino seria aterros sanitários industriais, ou a recuperação de sua energia térmica através de um processo de incineração. Entretanto, hoje este composto já possui diversos processos de reciclagem, que além de economicamente viáveis são ambientalmente menos impactantes que os anteriores. Em dois destes processos, as fibras residuais de papel podem comprometer a qualidade dos produtos finais fabricados, logo uma etapa de lavagem deste material para a retirada dessas fibras residuais é fundamental.

Os dois processos em questão são o da fabricação de *pellets* e o de reciclagem via plasma. Nesses dois processos o valor agregado final dos produtos é bastante elevado, o que leva a um interesse cada vez maior na reciclagem desse produto através destes processos. Outro fator importante é que em ambos os processos o ganho de escala e automação são possíveis o que aumenta sensivelmente a viabilidade econômica de ambos.

Com este panorama, entender a operação de um equipamento de lavagem que seja capaz de retirar o resíduo de celulose do material de forma eficiente é o primeiro passo na busca da otimização deste processo. E em se otimizando este processo aumentar-se-á a lucratividade da reciclagem desse composto garantindo, assim, o interesse na exploração desse mercado, além de incentivar e ampliar toda a cadeia de reciclagem das embalagens cartonadas assépticas que por consequência terá como resultado a diminuição sensível do impacto ambiental da disposição final deste tipo de embalagem.

II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresentaremos uma revisão da literatura pública acerca dos temas mais relevantes desta dissertação. Começaremos por uma descrição das embalagens cartonadas assépticas e todo o detalhamento do seu processo de coleta e tecnologias de reciclagem existentes no Brasil, terminando por apresentar os benefícios ambientais de sua reciclagem. Em seguida, faremos a apresentação do método dos elementos discretos (DEM) que foi utilizado neste trabalho, começando pela sua história, sua base teórica, suas principais aplicações e terminando com sua perspectiva de uso futuro. Por fim faremos um breve comentário sobre as propriedades físicas dos materiais, que serão necessárias no decorrer do desenvolvimento desta dissertação.

3. A reciclagem de embalagens cartonadas assépticas

3.1 – A embalagem cartonada asséptica

O surgimento das embalagens cartonadas assépticas, conhecidas como embalagens longa vida, é considerado um marco de inovação para indústria de alimentos que, através da combinação de uma tecnologia asséptica de processamento e envase do alimento e uma embalagem asséptica que barra a entrada de luz e oxigênio, possibilita a conservação de alimentos por um tempo maior sem a necessidade de refrigeração e sem adição de conservantes.

Uma embalagem cartonada asséptica é composta por 6 camadas de três materiais diferentes. De dentro para fora as camadas são duas de polietileno de baixa densidade, uma de alumínio, outra de polietileno de baixa densidade, uma papel, e mais uma de polietileno de baixa densidade sendo que cada camada tem uma determinada função na embalagem conforme Figura 3.1. Em massa, o papel representa em média 75%, o polietileno de baixa densidade 20% e o alumínio, 5% (NEVES,1999).



Figura 3.1 – Estrutura das embalagens longa vida
(TETRA PAK, 2006)

Na Figura 3.2 encontra-se uma ilustração de um corte transversal com a proporção de espessura de cada uma das camadas em uma embalagem cartonada asséptica. A numeração das camadas segue a mesma ordem da Figura 3.1.

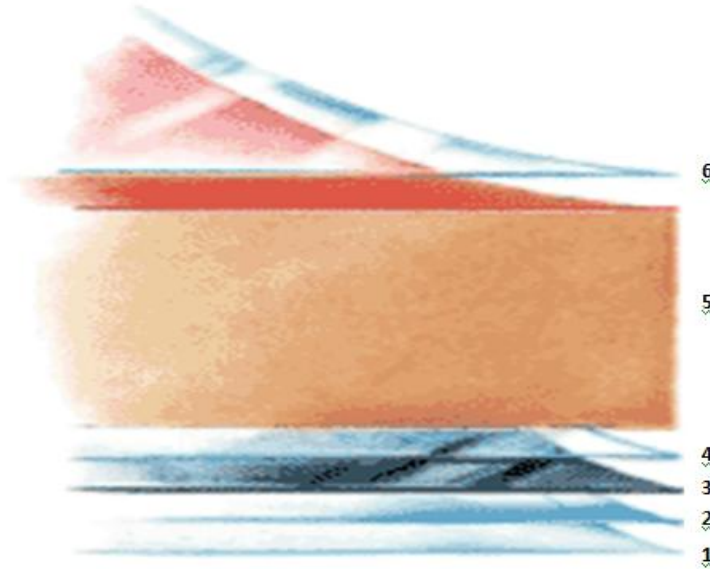


Figura 3.2 – Corte transversal ilustrativo de uma embalagem cartonada asséptica mostrando as diferentes espessuras das suas diversas camadas.
(CORTE TRANSVERSAL EMBALAGEM, 2011)

3.2 – O fluxo do processo de reciclagem no Brasil

Todo o processo de reciclagem de uma embalagem cartonada asséptica começa com o seu descarte após o consumo do produto que nela foi embalado e protegido. Este descarte pode seguir um de dois caminhos mostrados na Figura 3.3:

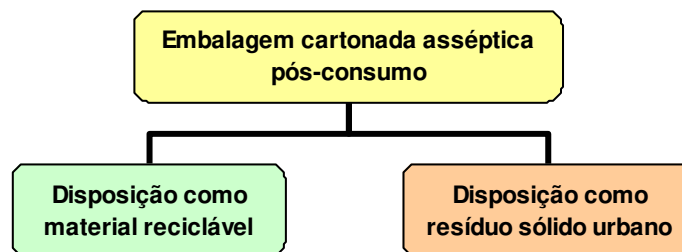


Figura 3.3 – Fluxograma de destino para embalagens cartonadas assépticas: Início.

3.2.1 – Disposição como resíduo sólido urbano

Este descarte ocorre quando o consumidor ou a pessoa responsável pela disposição do resíduo não tem nenhuma preocupação ambiental com o destino do resíduo gerado e/ou quando não há infra-estrutura operante para que este resíduo seja disposto de outra forma.

Sendo descartada desta forma, esta embalagem poderá ter um dos quatro destinos conforme Figura 3.4:

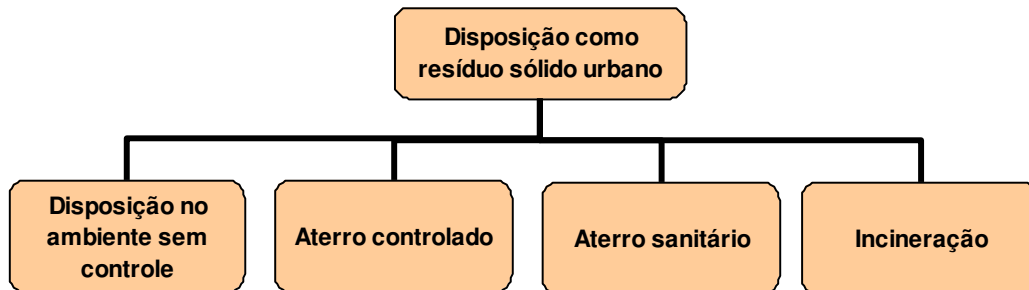


Figura 3.4 – Fluxograma de destino para embalagens cartonadas assépticas: Disposição como resíduo urbano.

3.2.1.1 - Disposição no ambiente sem controle

Acontece quando a disposição do resíduo é feita no meio ambiente sem qualquer tipo de controle. Lixo jogado em áreas abertas, encostas, rios, mares, ou em cidades que possuem vazadouros e lixões a céu aberto (ilustrados nas Figuras 3.5 e 3.6) são alguns exemplos deste tipo de disposição. Segundo o IBGE (2010) em sua pesquisa sobre saneamento básico 17,6% dos resíduos sólidos domiciliares coletados no Brasil são dispostos desta maneira, que somavam mais de 45 mil toneladas/dia no ano de 2008, conforme mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Quantidade diária de resíduos sólidos, domiciliares e/ou públicos, coletados e/ou recebidos, por unidade de destino - Brasil - 2008

Quantidade diária de resíduos sólidos, domiciliares e/ou públicos, coletados e/ou recebidos (t/dia)								
Total	Unidade de destino final dos resíduos sólidos coletados e/ou recebidos							
	Vazadouro a céu aberto (lixão)	Vazadouro em áreas alagadas ou alagáveis	Aterro controlado	Aterro sanitário	Unidade de compostagem de resíduos orgânicos	Unidade de triagem de resíduos recicláveis	Unidade de tratamento por incineração	Outra
259 547	45 710	46	40 695	167 636	1 635	3 122	67	636

(IBGE, 2010)



Figura 3.5 – Vazadouro a céu aberto.
(LIXÃO 01, 2010)



Figura 3.6 – Desenho ilustrativo de vazadouro a céu aberto.
(LIXÃO 02, 2010)

3.2.1.2 - Disposição em aterro controlado

Um aterro controlado é uma solução intermediária entre a disposição no meio ambiente sem controle e a disposição em um aterro sanitário. Se por um lado os resíduos são concentrados em um único local e cobertos com camadas de material inerte para minimizar os riscos a saúde pública e a segurança, por outro não há preocupação com a contaminação das águas subterrâneas próximas a ele e nem com os gases gerados pela decomposição dos materiais ali depositados (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 1995). A Figura 3.7 mostra um aterro controlado na cidade de Resende/RJ.



Figura 3.7 – Aterro controlado na cidade de Resende/RJ.
(ATERRO CONTROLADO, 2011)

3.2.1.3 - Disposição em aterro sanitário

Um aterro sanitário é a forma menos danosa de se dispor resíduos domiciliares no solo. Baseado em critérios de engenharia e em normas operacionais específicas, um aterro sanitário permite o confinamento dos resíduos em células seguras de modo a se ter controle sobre a poluição ambiental e aos riscos à saúde pública. A operação de aterros sanitários ganhou um novo impulso com o crescimento do mercado de créditos de carbono, possibilitando que através do uso dos gases provenientes das

células deste aterro para a produção de energia sejam obtidos créditos de não-emissão de carbono que podem ser comercializados dentro deste mercado, aumentando a viabilidade econômica deste tipo de empreendimento. Na Figura 3.8 temos a ilustração de células de um aterro com seus respectivos controles ambientais (IPT, 1995). Na Figura 3.9 apresenta-se uma foto de um aterro sanitário na cidade de Nova Iguaçu / RJ.

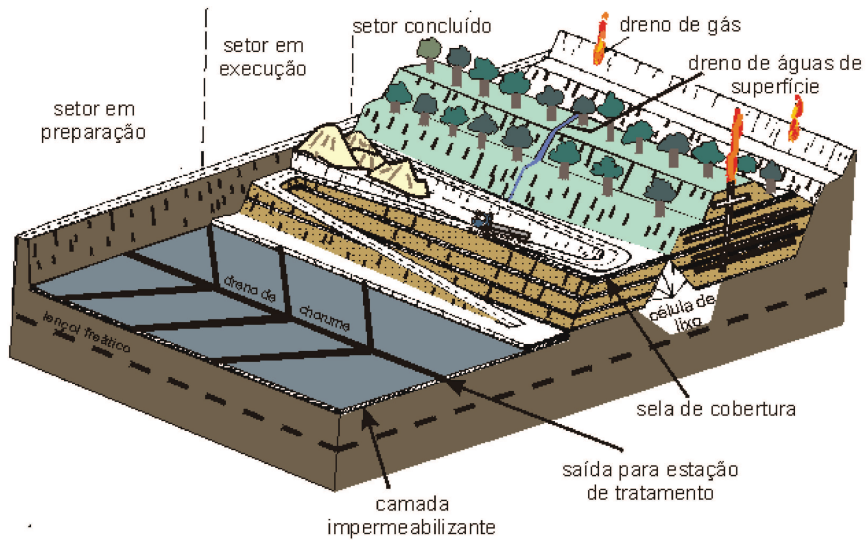


Figura 3.8 – Desenho esquemático de um aterro sanitário.
(IPT, 1995)



Figura 3.9 – Foto do aterro sanitário de Nova Iguaçu/ RJ.
(ATERRO SANITÁRIO 01, 2010)

3.2.1.4 - Incineração

É o processo pelo qual o resíduo sólido urbano é queimado em um incinerador industrial com ou sem a recuperação de sua energia visando a redução de peso, volume e periculosidade. Esta alternativa é utilizada no Brasil para o tratamento de resíduos de serviços de saúde devido a sua patogenicidade. Para resíduos sólidos urbanos, houve no passado iniciativas em algumas cidades como São Paulo, Belém e Manaus mas que hoje não estão mais em operação (MENEZES et al., 2000).

3.2.2 – Descarte como material reciclável

Por melhor ou pior que seja o controle ambiental para qualquer uma das alternativas apresentadas anteriormente, não é desejável a presença de embalagens cartonadas assépticas ou de qualquer outro material passível de reciclagem, pois, tanto pelo valor econômico como pelo benefício ambiental, sua reciclagem ou reaproveitamento seriam a melhor alternativa.

O descarte como material reciclável ocorre quando o consumidor ou a pessoa responsável pela disposição do resíduo tem preocupação ambiental e possui acesso a algum tipo de infra-estrutura para que se faça a separação e o encaminhamento deste resíduo de modo que este entre em um canal reverso que o levará até sua reciclagem.

Dados do IBGE (2010) apontam que cerca de 18% dos municípios brasileiros tem algum programa oficial de coleta seletiva, e que menos de 2% do total do resíduo sólido urbano coletado pelas prefeituras no Brasil seguem para a reciclagem.

Em contra partida, a coleta informal de materiais recicláveis está presente em todo o país e é a grande provedora de materiais recicláveis para as indústrias recicladoras. Não existe uma estatística oficial para o número de catadores de materiais recicláveis hoje no Brasil. O Movimento Nacional dos Catadores (MNCR) estima que existam cerca de 800 mil deles (MNCR, 2010). Este tipo de coleta informal é fortemente direcionada pelos preços dos diversos materiais, não sendo garantia de um destino adequado para todos os materiais recicláveis, principalmente os de menores preços e mercados.

Uma vez coletadas e separadas do resíduo sólido urbano as embalagens cartonadas assépticas seguirão seu caminho sendo reintroduzidas em um novo ciclo produtivo. Neste ponto novamente tem-se uma bifurcação como mostrado na Figura 3.10:

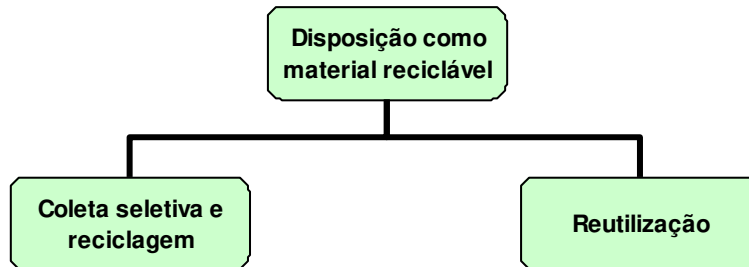


Figura 3.10 – Fluxograma de destino para embalagens cartonadas assépticas: Disposição como material reciclável.

3.2.2.1 - Reutilização

É o reaproveitamento da embalagem sem alteração na sua estrutura. Seidel (2004) apresenta algumas formas encontradas para a reutilização deste tipo de embalagem como trabalhos artesanais ou como forro térmico para telhados, contudo sua escala de produção é bastante reduzida e tais processos não podem ser considerados como uma solução viável ambiental e economicamente para o destino final adequado para este tipo de embalagem. Além da fraca demanda, estes materiais ainda necessitarão ser também reciclados ao final de sua vida útil e esta reciclagem pode ser dificultada e até impedida devido a utilização de outros produtos (cola, tintas, vernizes, entre outros) durante o seu processo de reutilização.

3.2.2.2 – Coleta seletiva e reciclagem

A coleta seletiva é a primeira etapa rumo ao reaproveitamento das matérias primas componentes desta embalagem. Esta etapa consiste de toda e qualquer forma de coleta diferenciada que permita com que os materiais recicláveis pós-consumo sejam coletados, transportados, concentrados, separados por tipos, beneficiados, e encaminhados/comercializados com suas respectivas indústrias recicladoras. No caso particular das embalagens cartonadas assépticas, depois de separadas, o único benefício

necessário durante esta etapa é o seu enfardamento para a redução de volume como forma de otimizar seu transporte.

A reciclagem é o processo industrial que faz a reintrodução de materiais a um novo ciclo produtivo. Desta maneira materiais antes considerados resíduos se tornam matérias primas para novos produtos. No caso das embalagens cartonadas assépticas cada um dos seus materiais será separado e reciclado dando origem a diversos tipos de produtos. Tal processo consiste em duas etapas independentes e sucessivas. A primeira delas é a reciclagem do papel e a seguinte, a reciclagem do composto de polietileno e alumínio (composto PE/Al).

3.2.2.2.1 - Reciclagem do papel

Uma vez coletadas e enfardadas através de iniciativas de coleta seletiva, as embalagens cartonadas assépticas pós-consumo são comercializadas com indústrias papeleiras onde será feita a extração das fibras celulósicas que compõem tal embalagem.

As embalagens cartonadas assépticas pós-consumo são adicionadas a um equipamento de desagregação chamado *hydrapulper* onde durante cerca de 30 a 40 minutos sofrerão ação mecânica em conjunto com água de processo fazendo com que as fibras que compõem esta camada se hidratem e fiquem em suspensão na água separando-se das camadas de polietileno e alumínio, segundo descreve Neves (1999). Ao final, a água com as fibras segue para um primeiro processo de limpeza para a retirada de impurezas e de pequenos pedaços de polietileno e alumínio gerados durante o processo de desagregação.

Depois disso as fibras podem seguir por dois processos distintos dependendo da indústria recicladora. O primeiro deles é a produção de papel, sendo a seqüência do processo outras etapas de limpeza, refinação, até sua entrada na máquina de papel onde será formada a folha de papel seguindo pela prensagem e secagem até chegar ao final da máquina como uma bobina de papel reciclado. O papel produzido pode ser usado para a produção de embalagens, tubetes, impressão e principalmente para a produção de papelão ondulado para embalagens secundárias (NEVES, 2004). O segundo processo é o deságüe mecânico destas fibras para a extração da maior quantidade de água possível, e a comercialização da polpa reciclada como matéria-prima substituinte de celulose virgem

em diversas aplicações dando destaque para sua utilização na fabricação de telhas de fibrocimento.

A portaria ANVISA 177 de 04 de março de 1999 (BRASIL, 1999) que regulamenta as disposições gerais para embalagens e equipamentos celulósicos em contato com alimentos e a resolução ANVISA RDC N.º 129, de 10 de maio de 2002 (BRASIL, 2002), que permite somente o uso de fibra celulósica reciclada em alimentos sólidos secos ou de ação extrativa pouco significativa, não permitem o uso de papel reciclado para embalagens que contenham alimentos líquidos ou pastosos, logo todo papel usado na fabricação de uma embalagem cartonada asséptica deve ser de fibra celulósica virgem, com a finalidade de se impedir qualquer tipo de contaminação ao produto que nela estiver envasado. Isto garante que o papel reciclado produzido a partir da reciclagem destas embalagens tenha uma qualidade, sobretudo em propriedades mecânicas, na média superior aos papéis reciclados produzidos a partir de aparas de papelão ondulado encontradas no mercado, como demonstraram Merendino e Neves (2007).

Em ambos os casos, o composto PE/Al resultante do processo é separado, enfardado e comercializado com recicladores deste tipo de material, seguindo os seus próprios processos de reciclagem.

Na Figura 3.11 tem-se a descrição do fluxo de reciclagem da primeira etapa da reciclagem de embalagens cartonadas assépticas.

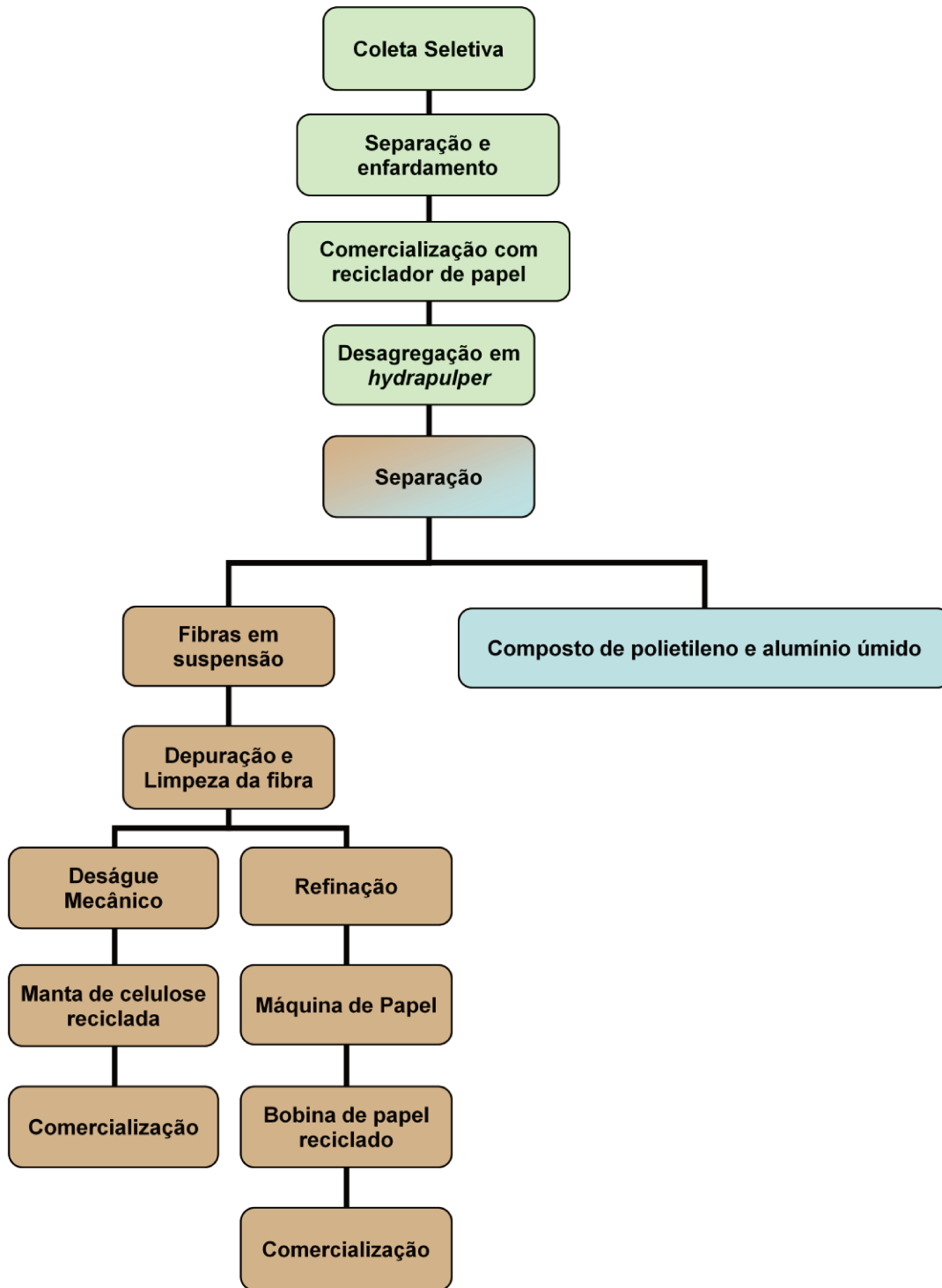


Figura 3.11 – Fluxograma de destino para embalagens cartonadas assépticas: Coleta seletiva e reciclagem das fibras de celulose.

3.2.2.2.2 - Reciclagem do composto de polietileno e alumínio

O resíduo gerado no primeiro processo de reciclagem das embalagens cartonadas assépticas tem dois destinos possíveis: continuar seu processo de reciclagem ou ser disposto de alguma forma. Para disposição final deste resíduo, ter-se-iam as opções de um aterro sanitário industrial ou o seu reaproveitamento energético através de processos de incineração ou co-processamento, sendo esta a mais comumente utilizada em países europeus. Estas alternativas já foram previamente comentadas e não serão foco de maiores detalhes. Já para a reciclagem deste composto, existem três alternativas industrialmente implementadas no Brasil, descritas a seguir.

3.2.2.2.2.1 - Reciclagem para fabricação de *pellets*

A fabricação de *pellets* foi a primeira alternativa desenvolvida e utilizada para a reciclagem do composto PE/Al. *Pellets* são pequenos grãos de plástico, forma usual para a venda de plásticos como matéria prima, os quais são comercializados com empresas do mercado de plástico para fabricação de objetos injetados e rotomoldados.

Este processo se inicia pela lavagem do material proveniente da primeira etapa de reciclagem para a extração completa do residual de fibra presente e que seria prejudicial na continuidade do processo. Atualmente esta lavagem é feita por lavadores centrífugos em batelada. Uma vez lavado o composto PE/Al passa por um processo de aglutinação para ganhar densidade antes de ser extrudado e cortado em *pellets*.

A Figura 3.12 a) mostra o aspecto físico dos *pellets* enquanto a Figura 3.12 b) mostra alguns produtos feito a partir destes.

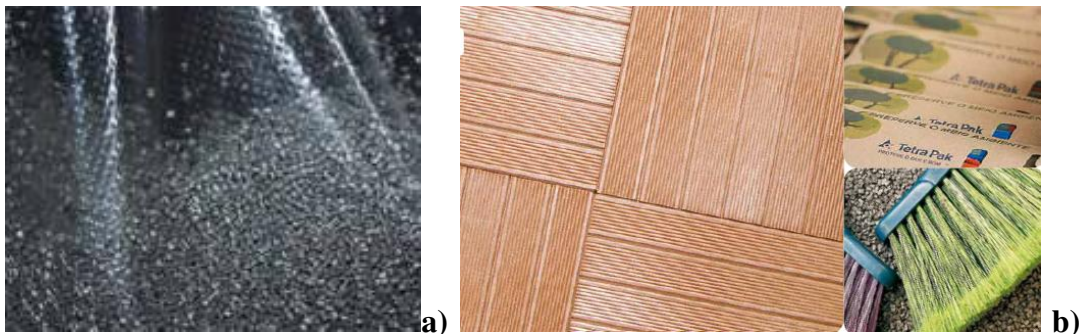


Figura 3.12 – a) *Pellets* do composto PE/Al b) Produtos fabricados a partir destes *pellets* (TETRA PAK, 2010)

Von Zuben e Neves (1999) descreveram todos estes processos e apresentaram as propriedades mecânicas dos *pellets* obtidos com a reciclagem do composto PE/Al.

3.2.2.2.2 - Reciclagem através de termofusão

Na termofusão, o composto PE/Al é derretido e aglomerado para a produção de placas e telhas para uso na construção civil. O composto PE/Al proveniente da primeira etapa de reciclagem é seco e triturado, facilitando o seu manuseio. Uma quantidade deste material é então envolta por um filme de material anti-aderente para que possa ser facilmente desmoldado ao final do processo. Todo o material é alimentado em uma prensa hidráulica aquecida a cerca de 180 °C que chega a cerca de 6 kgf/cm² de pressão. Nesta prensagem o polietileno se funde aglomerando-se com o alumínio. Após esta etapa o material é resfriado adquirindo, assim, resistência mecânica. Este resfriamento pode ser feito na forma plana, fabricando-se placas, ou então em um molde ondulado para produção de telhas. Cerqueira (2004) descreveu seu processo de produção, avaliou a resistência mecânica e o conforto térmico das telhas obtidas. Neste processo não há a necessidade de lavagem do composto PE/Al, visto que o residual de fibra nas proporções usualmente encontradas é benéfico para a resistência do material fabricado. Detalhes da telha e do processo de fabricação são mostrados na Figura 3.13 a) e b).

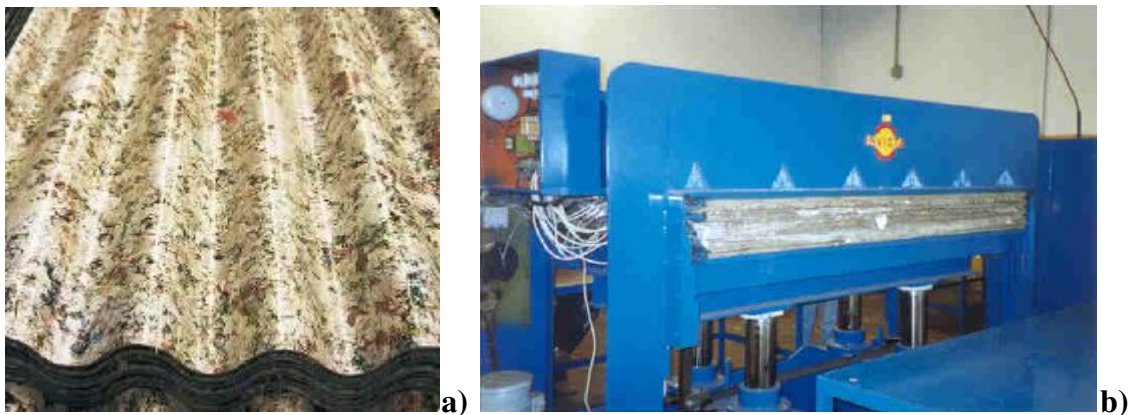


Figura 3.13 – a)Telha reciclada a partir do composto PE/Al b) Prensa para produção de telhas

a) (TETRA PAK, 2010), b) (CERQUEIRA,2004)

3.2.2.2.3 - Reciclagem via tecnologia de plasma

Nos dois processos anteriormente descritos, tanto polietileno como alumínio presentes no composto original são reciclados em conjunto, gerando assim seus produtos reciclados. Diferentemente neste processo, através da utilização de uma tocha de plasma como fonte de energia, o polietileno é completamente separado do alumínio contido no composto PE/Al sendo cada material aproveitado no seu respectivo mercado.

O processo se inicia da mesma maneira que o da fabricação de *pellets* com a lavagem do composto PE/Al para a retirada do papel residual, pois, também neste caso, a presença de fibras celulósicas comprometeria a qualidade dos produtos finais. Em seguida passa por um aglutinador contínuo para ganhar densidade e na seqüência é alimentado em um reator em atmosfera inerte (sem a presença de oxigênio). No reator, a temperatura da ordem de 750°C é garantida pela energia transferida por uma tocha de plasma. Esta tocha gera um jato de gás inerte, normalmente argônio, que passa através de um arco voltaico sendo imediatamente ionizado e atingindo o estado físico de plasma. Neste estado físico, uma grande quantidade de energia é liberada o que faz com que a temperatura no interior do jato seja muito elevada tornando a transferência de energia muito eficiente para o sistema do reator. No reator a cadeia carbônica do polietileno é quebrada em outras de menor peso molecular que, em virtude das temperaturas elevadas, são imediatamente convertidas em gás. Nesta temperatura, o alumínio atinge seu ponto de fusão tornando-se líquido. O gás é retirado do reator e condensado formando uma mistura de compostos parafínicos e o alumínio é vertido e resfriado em lingotes. Tanto o alumínio quanto a parafina são vendidos como matéria prima para seus respectivos mercados, destacando-se o fato de que o alumínio obtido é de grau alimentício, podendo voltar através de um novo processo de laminação a ser uma nova folha de alumínio para uma nova embalagem cartonada asséptica.

Esta é uma tecnologia 100% desenvolvida no Brasil e sua primeira planta industrial está instalada na cidade de Piracicaba/SP e se encontra em funcionamento desde 2005. Von Zuben (2006) descreveu o desenvolvimento desta tecnologia apontando seus benefícios ambientais. A Figura 3.14 apresenta uma tocha piloto de plasma e a vista da unidade industrial que opera esta tecnologia. Na Figura 3.15 tem-se um resumo dos processos de reciclagem para o composto PE/Al.

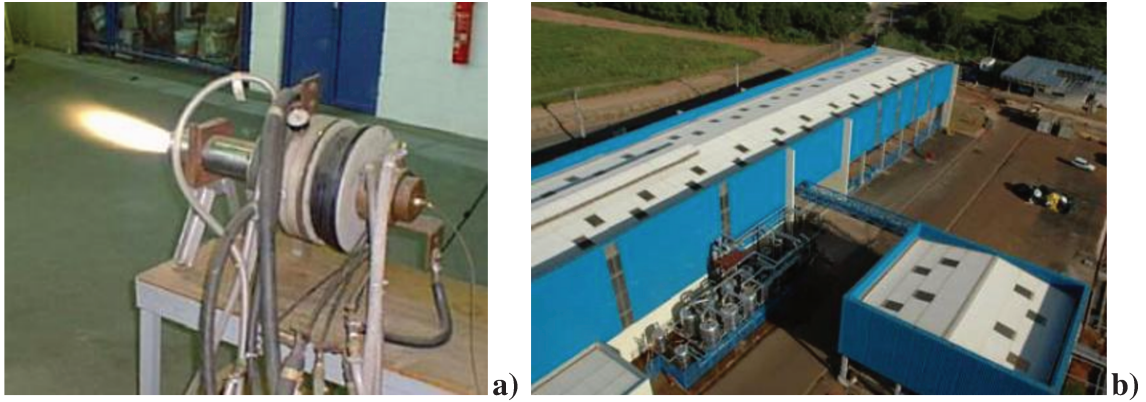


Figura 3.14 – a) Tocha piloto de plasma b) Vista da unidade industrial que opera a tecnologia de reciclagem via plasma.
(VON ZUBEN,2006)

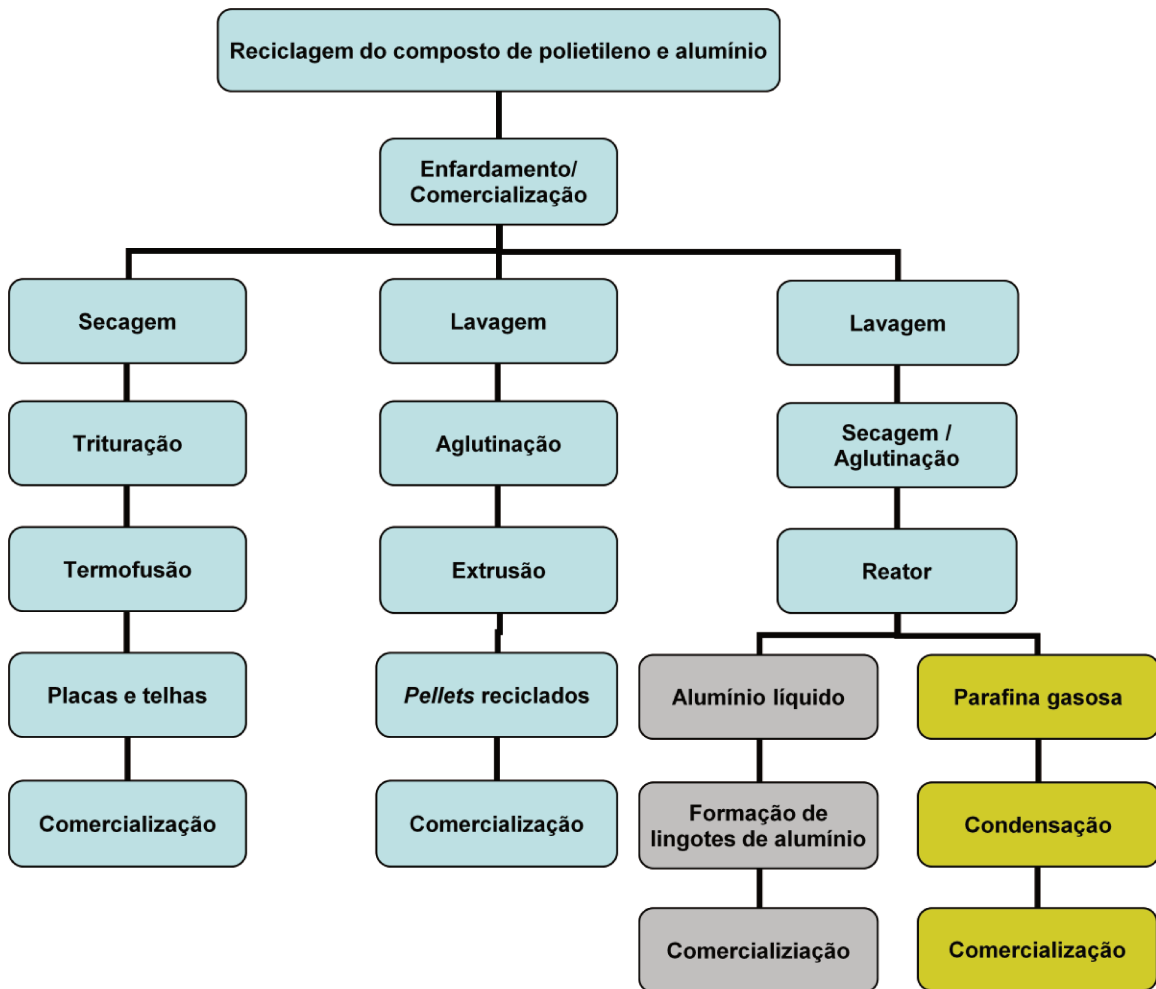


Figura 3.15 – Fluxograma de destino para embalagens cartonadas assépticas: Reciclagem do composto de polietileno e alumínio.

3.3 – Viabilidade ambiental dos processos de reciclagem

Para que realmente seja recomendada a reciclagem das embalagens cartonadas assépticas é preciso comprovar seu ganho ambiental. Mourad et al. (2006) demonstraram através de uma análise de ciclo de vida para o caso do leite embalado em embalagens cartonadas assépticas, tendo como base dois cenários: um onde a porcentagem de reciclagem dessas embalagens seria de 2% do total e um outro onde esta mesma porcentagem seria 22%. Comparando-se o primeiro cenário, de 2%, de com o segundo, de 22%, ganhos significativos são alcançados:

- Redução de 8% no consumo de água ao longo de todo ciclo de vida.
- Redução de 11% no consumo de madeira ao longo de todo ciclo de vida.
- Redução de 10% no uso de terra ao longo de todo ciclo de vida.
- Redução de 7% no volume em aterros ao longo de todo ciclo de vida.

Números expressivos que poderiam ser ainda maiores caso porcentagens maiores de reciclagem fossem alcançadas. Este estudo ainda não leva em conta os benefícios ambientais e os impactos positivos da tecnologia de reciclagem via plasma por ainda serem recentes, mas com certeza impactará positivamente, visto que o processo de obtenção de alumínio tem muita influência na avaliação de ciclo de vida das embalagens cartonadas assépticas. Como exemplo desses impactos ambientais positivos, temos que o consumo energético da tecnologia de reciclagem via plasma fica em 1 kWh/kg de alumínio produzido, segundo Von Zuben (2006), enquanto para a produção a partir do minério seria de 14,8 kWh/kg (SILVA, 2001). Outro ponto a favor da tecnologia de reciclagem via plasma é praticamente não há emissões para o meio ambiente, uma vez que toda a matéria prima é convertida em produtos, os gases usados na geração do plasma são recuperados. Além disso, a única fonte de energia é eletricidade.

3.4 – Viabilidade econômica dos processos de reciclagem

Apresentadas as alternativas técnicas para a reciclagem das embalagens cartonadas assépticas pós-consumo e comprovado seu benefício ambiental fica faltando

somente a comprovação de sua viabilidade econômica. Em seu trabalho, Seidel (2004) demonstra a viabilidade econômica encontrada nas diversas etapas de reciclagem das embalagens cartonadas assépticas pós-consumo. A análise englobou as duas etapas para a reciclagem deste tipo de embalagem, a reciclagem do papel, e do composto PE/Al. Para a reciclagem de papel além do ganho de qualidade no papel produzido já mencionado, o custo de obtenção das fibras recicladas das embalagens cartonadas assépticas é bem próximo, e dependendo do caso, inferior ao custo para sua obtenção através reciclagem de aparas de papelão ondulado. Para o composto PE/Al foram estudados os casos para a produção de telhas e para a produção de *pellets* reciclados, e em ambos foram obtidas lucratividades de 24% para a fabricação de telhas e de 31% para a fabricação de *pellets*.

3.5 – A reciclagem de embalagens assépticas no mundo

Em termos de tecnologias utilizadas nos demais países do mundo não há grandes diferenças quanto a reciclagem das fibras de celulose das embalagens cartonadas assépticas, ou seja, para esta etapa não existem variações. Já para a recuperação do composto de polietileno e alumínio, existem. Na Europa, a maior parte deste material é incinerado com recuperação energética. Existe uma única planta que utiliza a tecnologia de pirólise obtendo óxido de alumínio e gás combustível a partir do composto de polietileno e alumínio (VON ZUBEN, 2002), porém sua escala de produção é pequena. No Japão, Estados Unidos, e Alemanha a incineração é a tecnologia utilizada para a recuperação energética para o composto de polietileno e alumínio. Tecnologias de reaproveitamento do composto de polietileno e alumínio em forma de placas e *pellets* têm começado a ser desenvolvidas na América Latina, Sudeste Asiático, Egito, Turquia e Leste Europeu.

Isto mostra em termos efetivos, que o Brasil tem liderança tanto em pesquisa quanto em implementação de tecnologias de reciclagem para embalagens cartonadas assépticas.

3.6 – A reciclagem de embalagens assépticas no Brasil

A reciclagem de embalagens vem crescendo continuamente nos últimos anos no Brasil como mostra a Figura 3.16. Este crescimento reflete todo o trabalho de pesquisa

e desenvolvimento realizado pela Tetra Pak, principal fornecedor deste tipo de embalagem na pesquisa e no desenvolvimento de tecnologias para a reciclagem dessas embalagens, já apresentado neste trabalho, mas também no trabalho de divulgação, disseminação e implementação destas tecnologias para que estas sejam efetivamente utilizadas.

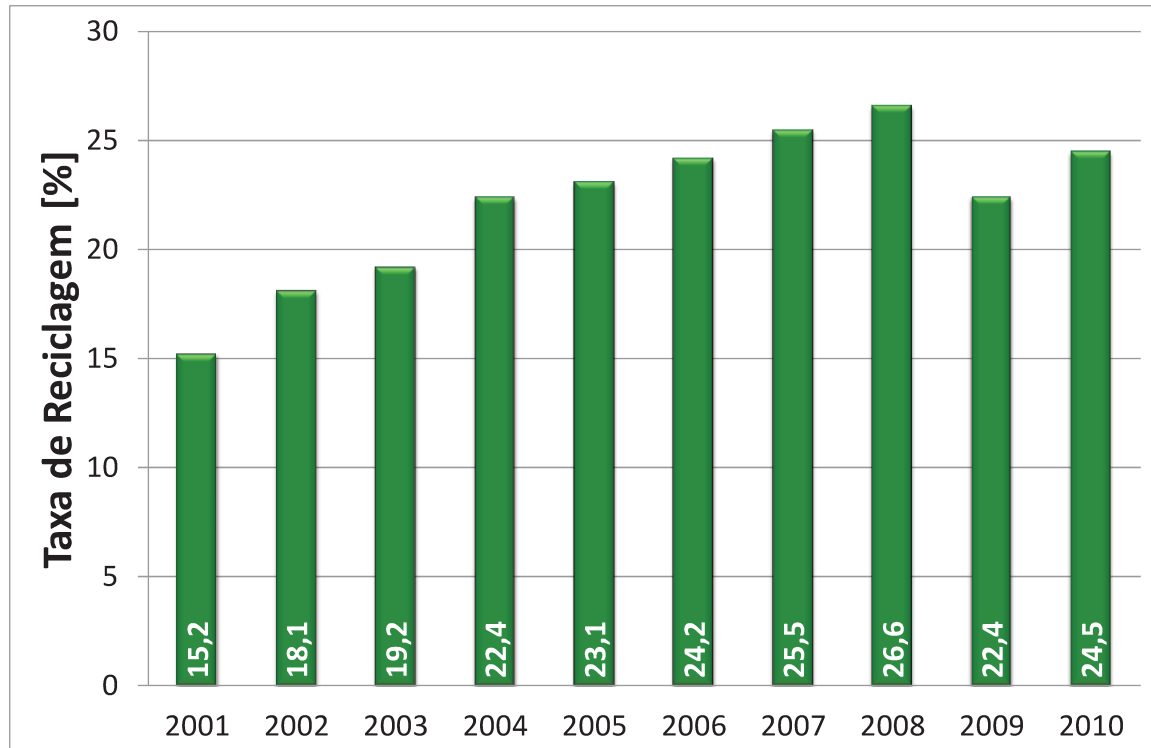


Figura 3.16 – Gráfico de evolução da taxa de reciclagem de embalagens cartonadas assépticas no Brasil (TETRA PAK, 2010) e (CEMPRE, 2011)

No ano de 2009 em virtude da crise econômica mundial observa-se uma queda na porcentagem de reciclagem. Os efeitos da crise provocaram queda na demanda de produtos feitos de materiais recicláveis e, conseqüentemente, da matéria prima desses produtos. No Brasil, a indústria da reciclagem ainda é alimentada em boa parte pelo trabalho informal. A desvalorização do produto oferecido por essas pessoas, que atuam sob condições de fragilidade, foi um grande fator desmotivador para a continuidade de suas atividades, fazendo com que muitas delas optassem por migrar para setores mais rentáveis da economia. A partir 2010 houve um processo de recuperação dos preços e recuperação nos volumes reciclados.

Hoje se tem uma situação onde a maior restrição a todo este processo de reciclagem não está na falta de capacidade produtiva para a reciclagem das embalagens cartonadas assépticas, nem na indisponibilidade de tecnologias, mas sim está no canal de que traz estas embalagens das casas dos consumidores até as portas dos recicladores. Este canal é majoritariamente informal e altamente dependente do preço pago pelo material. Esta dependência é mostrada no caso comentado por Merendino e Neves (2006) em seu estudo sobre a reciclagem de embalagens cartonadas assépticas na cidade de São Paulo.

Neste ponto o desenvolvimento de tecnologias para a reciclagem do composto PE/Al vem sendo fundamental em agregar valor às embalagem pós-consumo. Pelo gráfico abaixo, Figura 3.17, pode-se ver a evolução do incremento deste material reciclado:

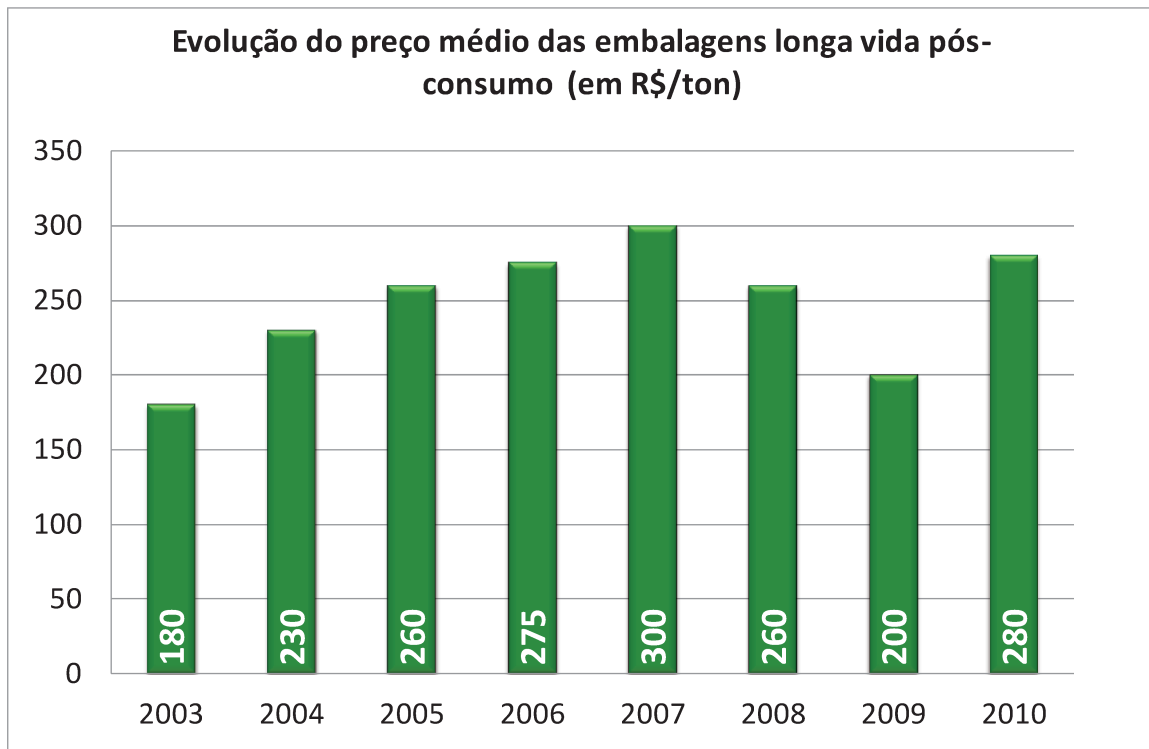


Figura 3.17 – Gráfico de evolução do preço médio pago pela tonelada de embalagens longa vida cartonadas assépticas pós-consumo no Brasil (TETRA PAK, 2010)

Com o valor agregado pela reciclagem do composto PE/Al ao longo dos anos houve uma desoneração do reciclador de papel possibilitando que este repassasse o valor

para a compra de mais embalagens pós-consumo, aumentando sua captação que geraram, por consequência, uma maior quantidade do composto PE/Al disponível para que os seus recicladores pudessem aumentar suas produções gerando, assim, um círculo virtuoso que ainda está em vigor. Com a entrada da tecnologia de reciclagem via plasma este ciclo está sendo ainda mais revigorado, que mesmo competindo pela mesma matéria-prima, deixa espaço para a co-existência entre todas as tecnologias.

4. Método dos elementos discretos (DEM)

4.1 – Introdução

O método dos elementos discretos (DEM, do inglês *Discrete Element Method*) é um método numérico capaz de descrever o comportamento mecânico de partículas ou conjunto de partículas baseando-se no uso de um algoritmo numérico explícito que acompanha a interação de cada partícula, contato por contato, com as outras partículas e geometrias físicas que as cercam modelando-se, assim, individualmente seu movimento.

O método baseia-se na análise do balanço das forças atuantes em cada uma das partículas que compõem o sistema (elementos discretos), cada qual com suas propriedades mecânicas particulares e geometrias definidas. O intervalo de tempo entre cada iteração é definido de modo que este seja suficientemente curto para que os distúrbios causados pelo movimento e contato entre cada partícula não se propaguem para muito além da vizinhança onde estes ocorreram e para que as acelerações das partículas possam ser consideradas constantes e os demais parâmetros possam ser calculados. Na seqüência é feita a análise do sistema buscando as interações de cada partícula com as partículas em sua vizinhança e atualizando as forças de contato entre as mesmas. Em função do balanço de forças atuantes em cada uma delas neste instante de tempo, determina-se a nova configuração do meio no instante de tempo seguinte por meio da aplicação da segunda Lei de Newton.

4.2 – Histórico

Embora seja baseado em teorias e métodos conhecidos desde o final da década de 50 e início da década de 60, o DEM tem seu ponto inicial marcado pelo trabalho apresentado por Cundall e Strack (1979). Neste trabalho foi apresentada sua fundamentação teórica, implementação numérica e aplicação prática para a descrição de conjuntos de discos e esferas visando à simulação do comportamento de meio fraturados e meios granulares. Sua contribuição principal foi a introdução do processo de relaxação dinâmica para a resolução das equações de equilíbrio do meio discreto tornando-se

possível a resolução de problemas complexos envolvendo não linearidades físicas e geométricas (VELOSO et al., 2003).

Após seu surgimento seguiram-se vários trabalhos relacionados à engenharia geotécnica, como nos trabalhos citados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Artigos relacionados a temas de engenharia geotécnica

TEMA	ARTIGOS RELACIONADOS
Simulação de escavações de subsolos	Lorig e Brady (1984)
	Lemos (1987)
Interação de estruturas rochosas	Ting e Corkum (1988).
	Vargas Jr. (1982)
Simulação de transporte de rochas	Lemos (1987)
	Kafritsas e Einstein (1987)
	Harper e Last (1989)

A partir do avanço do poder computacional, o DEM ganhou força, a partir da segunda metade da década de 90, onde se constata pelo gráfico apresentado na Figura 4.1, o aumento expressivo do número de artigos publicados relacionados a este método. Tal gráfico foi obtido através de pesquisa realizada no site www.sciencedirect.com em 15 de novembro de 2011 pelas palavras-chave: *discrete element method/model*, *distinct element method/model*, *discrete particle simulation/ method/model*, and *granular dynamic simulation*.

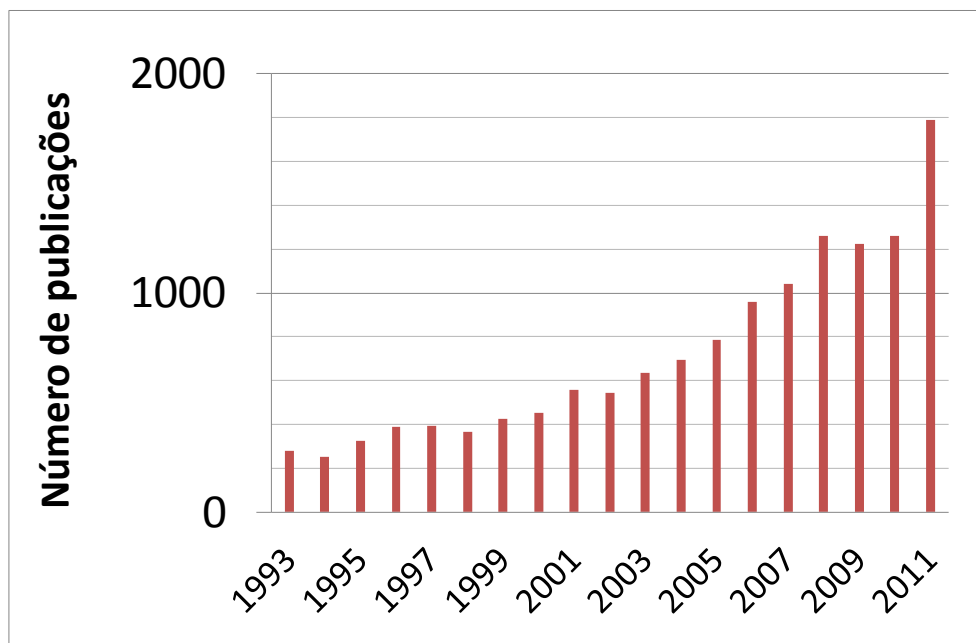


Figura 4.1 – Publicações relacionados à simulação discreta de partículas ao longo dos últimos anos.

Além de sua aplicação original, atualmente o DEM é tido como uma ferramenta de simulação popular e poderosa para as disciplinas de engenharia química e tecnologia energética (KRUGGEL-EMDEN et al., 2006) conforme os exemplos citados na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Artigos relacionados à simulação de processos industriais

TEMA	ARTIGOS RELACIONADOS
Agitação e separação em tambores rotativos	Van Puyvelde (2006), Yang et al. (2003), Pandey et al. (2006), Kwapinska et al. (2006), Bertrand et al. (2005), Kruggel-Emden et al. (2007) , e Cleary (2010).
Leitos Fluidizados	Limtrakul et al. (2004), Tatemoto et al. (2005), Zhong et al. (2006), Malone e Xu (2008).
Descargas de silos e transporte de materiais	Arratia et al. (2006), Kruggel-Emden et al. (2006), Balevicius et al. (2006), Owen e Cleary (2009), Cleary (2010) e Grima e Wypych (2011).

Hoje as geometrias das partículas de discos e esferas utilizadas inicialmente no DEM não são as únicas levadas em conta nos desenvolvimentos e aplicações deste método. Contudo a grande maioria destes desenvolvimentos utilizam-se de formas criadas a partir de conjuntos de discos e esferas para simplificação das superfícies de contato (POURNIN e LIEBLING, 2005). A evolução para contatos baseados em formas não-esféricas é apontado por Zhu et al. (2007) como um dos pontos a ser estudado em trabalhos futuros. Cleary (2010) mostrou avanço nesta área apresentado formas de partículas usando equações super-quadráticas e avaliando, para uma mesma situação, diferentes resultados para os ângulos de falha e de resposta quando variadas as formas das partículas, contudo propõem que haja um balanço entre a correta forma da partícula estudada e o custo computacional de sua simulação.

Outro ponto interessante apresentado por Zhu et al. (2007) é a necessidade de uma melhor compreensão teórica das forças de interação entre partículas e entre partícula e fluido bem como sua comprovação e quantificação através de experimentos práticos, como itens de desenvolvimento futuro para o método. Grima e Wypych (2011) apontam, apesar de todos os avanços, uma lacuna de validação experimental para modelos DEM na literatura e de métodos de calibração e de aumento de escala para estes modelos.

4.3 – Equações governantes

O movimento descrito por um determinado sistema de partículas pode ser decomposto em termos da somatória dos movimentos translacional e rotacional de cada partícula que compõem este sistema. Em intervalos de tempo reduzidos, somente contatos entre partículas, partícula e paredes, e partícula e fluido na vizinhança imediata geram forças e torques que afetam e alteram este movimento. Sendo assim a segunda Lei de Newton pode ser usada para generalizar o movimento de uma partícula i , de massa m_i e momento de inércia I_i :

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j F_{ij}^C + \sum_k F_{ik}^{NC} + F_i^f + F_i^g \quad [4.1]$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j M_{ij} \quad [4.2]$$

onde v_i e ω_i são as velocidades translacional e rotacional da partícula i , F_{ij}^C e M_{ij} são respectivamente as forças de contato e torque atuante na partícula i pela partícula j ou pela parede do sistema, F_{ij}^{NC} são as forças de não-contato atuantes na partícula i pela partícula k ou outras fontes, F_i^f é a força de interação partícula-fluido exercida na partícula i , e por fim F_i^g é a força gravitacional que age na partícula i . Em um desenho esquemático (Figura 4.2) tem-se a seguinte configuração:

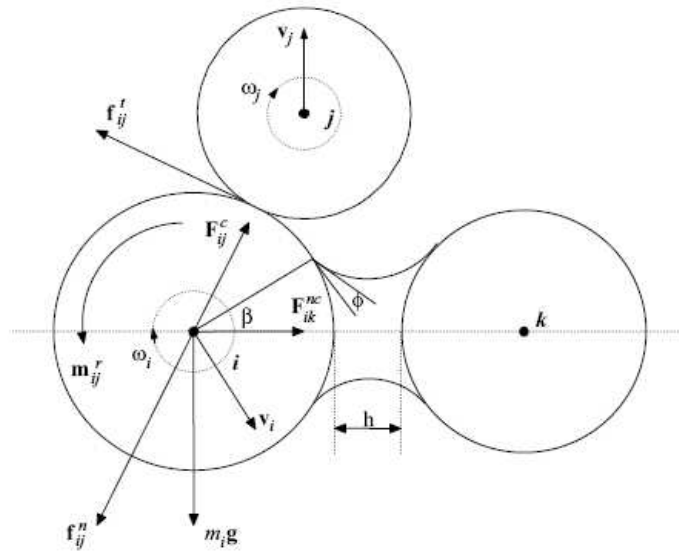


Figura 4.2 – Ilustração do esquema de forças atuando na partícula i através do contato com a partícula j e do não-contato com a partícula k (neste caso força de capilaridade) (ZHU et al., 2007)

4.4 – Modelo para forças de contato

Com relação as forças entre partículas existem duas variações de abordagem para implementação do DEM : *soft-particle* e *hard-particle*. Na abordagem *soft-particle*, pequenas deformações são permitidas e utilizadas para o cálculo de forças elásticas, plásticas e de atrito entre as partículas. As deformações são consideradas e calculadas considerando as sobreposições entre duas partículas ou entre a partícula e a parede. Tais sobreposições são muito menores que o tamanho das partículas envolvidas. Esta abordagem permite o manejo de múltiplos contatos, que é bastante útil em sistemas

quase-estáticos. Na abordagem *hard-particle* cada partícula é considerada um corpo rígido sendo cada colisão computada em um tempo e como sendo instantânea. Este método é especialmente interessante para fluxos granulares de grande velocidade.

Os modelos mais comuns e intuitivos são os modelos lineares, dentre eles destaque é dado para o proposto por Cundall e Strack (1979) chamado de *linear spring-dashpot model*. Neste modelo, uma mola é usada para o cálculo da deformação elástica enquanto um modelo de amortecedor leva em conta a dissipação viscosa.

Dentre os métodos mais complexos e não lineares destaca-se o modelo de Hertz-Mindlin e Deresiewicz, que leva em conta a união dos trabalhos de Hertz com relação ao contato elástico entre esferas, e o modelo geral proposto para força tangencial de Mindlin e Deresiewicz (1953). Aplicações deste modelo podem ser vistas nos trabalhos Vu-Quoc e Zhang (1999a,b) e Di Renzo e Di Maio (2004). Devido a sua complexidade o uso completo deste método acaba por aumentar significativamente o tempo computacional das simulações, sobre tudo naquelas que envolvem um grande número de partículas. Por isso simplificações deste modelo são freqüentemente implementadas como nos trabalhos de Walton and Braun (1986a) e Walton (1993), de Thornton e Yin (1991), e Langston et al. (1994).

Teoricamente os métodos não lineares mesmo que simplificados deveriam ter resultados mais precisos que os métodos lineares, contudo não foi o que demonstrou o estudo realizado por Di Renzo e Di Maio (2004) que apresenta em alguns casos modelos lineares obtendo resultados mais precisos. Isto se deve talvez ao fato destes modelos não-lineares trabalharem com formas geométricas ideais, o que não acontece em experimentos práticos. A determinação correta dos parâmetros dos métodos também tem seu papel importante no alcance de melhores resultados. Em virtude desses aspectos, esta ainda é uma área para ser explorada em trabalhos futuros para aprimoração do método.

4.5 – Software EDEM®

Em virtude de sua ampla aplicação em diversas áreas industriais, já existem implementados códigos comerciais para o uso e aplicação do DEM. Entre os quais destaca-se o EDEM® da empresa *DEM Solutions*. Este software tem implementado em seu código os métodos de resolução das equações geradas pelo método, os modelos de

forças de interação partícula-partícula, e os algoritmos de busca e caracterização de contatos, cabendo ao usuário a definição do problema, sua geometria, suas condições iniciais e de contorno, possibilitando a aplicação de todo o conhecimento acumulado para este método de maneira organizada e com o foco no seu resultado prático para uma situação real.

Além da resolução em si, o pacote EDEM® possibilita a análise de grande parte das grandezas físicas envolvidas no sistema a cada intervalo de tempo simulado, resultando em uma ferramenta poderosa de solução de problemas de engenharia. Favier (2007) apresentou os benefícios que a simulação utilizando o EDEM® pode trazer na otimização de processos industriais, bem como seu acoplamento com outras ferramentas de simulação como, por exemplo, a análise de elementos finitos (FEA) e a fluidodinâmica computacional (CFD).

4.5.1 – Modelos de contato no EDEM®

Os modelos de contato são a base do método dos elementos discretos, eles descrevem como os elementos se comportam quando entram em contato uns com os outros (DEM SOLUTIONS, 2007a).

Abaixo três destes métodos são descritos:

4.5.1.1 - Modelo de contato *Linear spring*

Este modelo para força de contato é baseado no trabalho de Cundall e Strack (1979). Uma mola linear com rigidez k está em paralelo com um amortecedor com coeficiente c . A grandeza da força normal, F_N , entre as duas partículas é dado por :

$$F_N = k\delta + c\dot{\delta} \quad [4.3]$$

onde δ é a sobreposição entre os dois corpos e $\dot{\delta}$ é a velocidade de sobreposição. Uma força similar é aplicada na direção tangencial.

A rigidez da mola e o coeficiente do amortecedor são parâmetros neste modelo. É uma prática comum estimar a rigidez da mola e calcular o coeficiente do amortecedor baseada nesta rigidez.

Os coeficientes também podem ser calculados com base em propriedades dos materiais e de restrições cinemáticas. Um método comum é obtido equacionando a máxima energia de alongamento em um contato tipo Hertzian ($E_{hertzian}$) com a máxima energia de alongamento de um contato existente (E_{max}), que nos dá:

$$k = \frac{16}{15} R^{*\frac{1}{2}} E^* \left(\frac{15 m^* V^2}{16 R^{*\frac{1}{2}} E^*} \right)^{\frac{1}{5}} \quad [4.4]$$

Onde V é a velocidade de colisão, m^* é a massa efetiva, dado por

$$m^* = (1/m_1 + 1/m_2)^{-1} \quad [4.5]$$

R^* é o raio efetivo, dado por

$$R^* = (1/R_1 + 1/R_2)^{-1} \quad [4.6]$$

e E^* é o Modulo de Young efetivo, calculado por

$$1/E^* = (1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2 \quad [4.7]$$

ν_1 e ν_2 são os coeficientes de Poisson de cada partícula

O coeficiente do amortecedor c está relacionado com o coeficiente de restituição da seguinte maneira:

$$c = \sqrt{\frac{4m^*k}{1 + \left(\frac{\pi}{\ln e}\right)^2}} \quad [4.8]$$

onde e é o coeficiente de restituição

A força tangencial a rigidez associada a esta força é usualmente estimada como uma taxa da rigidez da força normal (Cundall e Strack, 1979). Adota-se, então, esta rigidez como sendo igual à rigidez normal. O coeficiente do amortecedor é calculado como mostrado acima. A força tangencial é limitada pela fricção de Coulomb logo temos:

$$F_T = \min (k_t \delta + c_t \dot{\delta}, \mu F_N) \quad [4.9]$$

onde k_t e c_t são a rigidez tangencial e o coeficiente de amortecimento tangencial, μ é o coeficiente de atrito estático.

A velocidade de impacto em uma simulação pode usualmente ser tomada como uma velocidade característica na simulação. Sendo assim pode-se assumir que esta velocidade é a máxima velocidade na simulação

4.5.1.2 - Modelo de contato *Hertz-Mindlin (no slip)*

Este modelo de contato tem como base o trabalho de Mindlin (1949). Tem precisão e eficiência no cálculo das forças envolvidas entre as partículas e elementos.

A força normal, F_n , segue a expressão:

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \quad [4.10]$$

onde E^* é o Modulo de Young efetivo, R^* é o efetivo e δ_n é a sobreposição normal. Adicionalmente há a força de amortecimento (*damping force*), F_n^d , expressa por:

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \beta \sqrt{S_n m^* v_n^{rel}} \quad [4.11]$$

onde m^* é a massa efetiva, v_n^{rel} é a componente normal da velocidade relativa e β e S_n (rigidez normal) são calculados pelas expressões:

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \quad [4.12]$$

$$S_n = 2Y^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad [4.13]$$

com e sendo o coeficiente de restituição.

A força tangencial, F_t , depende de dois valores: da sobreposição tangencial, δ_t , e da rigidez tangencial, S_t , sendo expressa como

$$\vec{F}_t = -S_t \vec{\delta}_t \quad [4.14]$$

Com

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad [4.15]$$

Da mesma maneira adicionalmente existe a força de amortecimento tangencial \vec{F}_t^d

$$\vec{F}_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_t m^*} \vec{v}_t^{rel} \quad [4.16]$$

onde \vec{v}_t^{rel} é a velocidade tangencial relativa. A força tangencial é limitada pela fricção de Coulomb, $\mu_s F_n$, onde μ_s é o coeficiente de atrito estático.

Para simulações onde a fricção de rolamento é importante, isto é computado pela aplicação de um torque nas superfícies de contato:

$$\vec{\tau}_i = -\mu_r F_n R_i \vec{\omega}_i \quad [4.17]$$

com μ_r sendo o coeficiente de atrito de rolamento, R_i a distância do ponto de contato até o centro de massa do objeto i e $\vec{\omega}_i$ o vetor unitário de velocidade angular do objeto i no ponto de contato.

4.5.1.2 - Modelo de contato *Linear Cohesion*

Este modelo de coesão modifica os modelo de contato *Hertz-Mindlin* e *Linear Spring* pela adição à força normal de uma força de coesão. Esta força é dada por

$$F = kA \quad [4.18]$$

onde A é a área de contato e k é a densidade de energia de coesão com unidade de Jm^{-3} .

Nenhuma adição é feita a força tangencial neste modelo, entretanto a grandeza da força normal é aumentada e por consequência uma maior força de fricção tem de ser superada antes do deslizamento.

5. Propriedades mecânicas dos materiais

5.1 – Módulos de Elasticidade

Módulos de Elasticidade são medidas de resistência de um material a uma deformação elástica (como uma mola) quando submetido a uma força

$$\lambda \stackrel{\text{definição}}{=} \frac{\text{tensão}}{\text{deformação}} \quad [5.1]$$

onde λ é o modulo de elasticidade, *tensão* é a força causadora da deformação por unidade de área onde esta força está aplicada e a *deformação* é o quanto este corpo é deformado pela ação da tensão com relação ao tamanho original.

Especificando como a tensão e a deformação são aplicadas, incluindo suas direções, é possível definição de vários tipos de módulos de elasticidade, os mais utilizados são:

- *Módulo de Young (E)*: descreve a tendência de um objeto deformar ao longo de um eixo quando forças opostas são aplicadas ao longo deste eixo. É definido como a tensão de tração aplicada pela deformação ocasionada por esta tração. Muitas vezes é chamado de módulo de elasticidade.
- *Módulo de Cisalhamento ou de Rigidez (K)*: descreve a tendência de um objeto ao cisalhamento, que é a deformação da forma deste a volume constante.
- *Módulo Bulk* : descreve a elasticidade volumétrica de um objeto ou seja, a tendência de um objeto a se deformar quando sob pressão. É o equivalente do módulo de Young em três dimensões.
- *Coefficiente de Poisson*: é a relação entre a deformação lateral e a deformação axial de um corpo quando submetido a uma tração ou compressão axial.

Outros módulos elásticos são o Primeiro parâmetro de Lamé, e o módulo P-wave. Em materiais sólidos homogêneos e isotrópicos (materiais que tem o mesmo comportamento em todas as direções) tem suas propriedades elásticas lineares descritas por dois, e quaisquer dois, módulos de elasticidade.

5.2 – Coeficiente de Poisson

Qualquer alongação ou compressão de um material em uma direção, causada por uma força uniaxial, produz um ajustamento nas dimensões perpendiculares à direção da força. A relação entre a deformação lateral e axial é dado o nome de Coeficiente de Poisson, conforme mostram a Equação 5.2 e a Figura 5.1.

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} \quad [5.2]$$

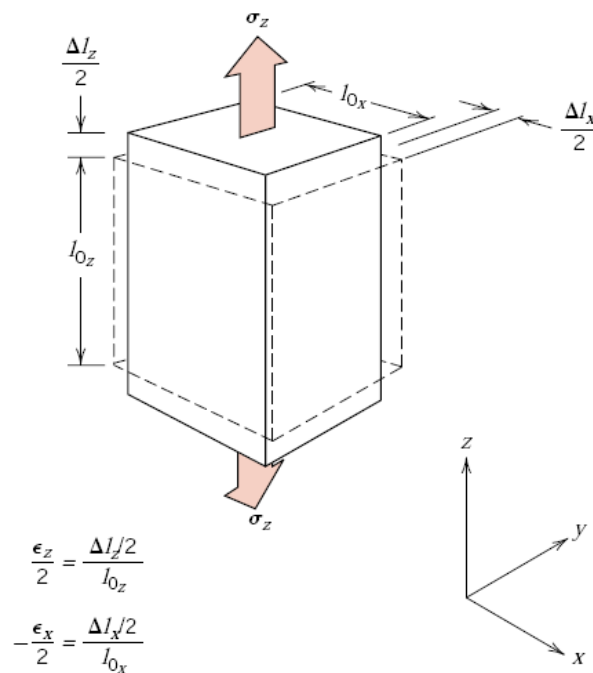


Figura 5.1 – Elongação axial na direção z (deformação positiva) e contração lateral nas direções x e y (deformações negativas) em resposta a uma tensão de tração. Linhas contínuas representam as dimensões após a aplicação da tensão; as tracejadas, antes dessa aplicação

(CALLISTER, 2001)

5.3 – Módulo de Cisalhamento ou de Rigidez

Tensões de cisalhamento produzem deslocamento de um plano de átomos em relação ao plano adjacente. O módulo de cisalhamento descreve as deformações sofridas por um determinado material quando submetido a estas tensões de cisalhamento, como mostra a Figura 5.2:

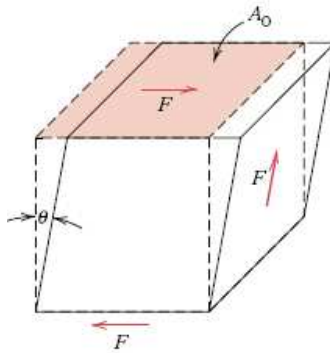


Figura 5.2 – Esquema da deformação sofrida por um objeto devido a ação de uma tensão de cisalhamento.

(CALLISTER, 2001)

Matematicamente pode ser descrita como a relação abaixo:

$$G \stackrel{\text{definição}}{=} \frac{\sigma_{xy}}{\varepsilon_{xy}} = \frac{F/A}{\Delta x/h} = \frac{Fh}{\Delta x A} \quad [5.3]$$

onde

$\sigma_{xy} = F/A$ é a tensão de cisalhamento

F é a força atuante no objeto

A é a área onde esta força atua

$\varepsilon_{xy} = \Delta x/h = \tan \theta$ é deformação devido ao cisalhamento do objeto

Δx é o deslocamento transversal

h é altura inicial do objeto

6. Propriedades dinâmicas dos materiais

6.1 – Coeficiente de restituição

Coeficiente de restituição (C_r) é a relação entre a velocidade de separação e a velocidade de aproximação de dois corpos em uma colisão:

$$C_r = \frac{(v_2' - v_1')}{(v_1 - v_2)} \quad [6.1]$$

onde v_1 e v_2 são as velocidades imediatamente anterior a colisão e v_1' and v_2' são as velocidades imediatamente após esta colisão.

Para um único corpo, tem-se

$$C_r = \frac{v'}{v_0} \quad [6.2]$$

Onde v_0 é a velocidade inicial e v' é a velocidade após a colisão.

6.2 – Coeficiente de atrito estático

O coeficiente de atrito estático, μ_s , é um valor escalar utilizado para determinar a quantidade de força necessária para que um objeto inerte, de um determinado material, em repouso em uma superfície conhecida, seja posto em movimento.

A força F , pode ser definida pela equação

$$F = \mu_s N \quad [6.3]$$

onde N é a reação normal ao peso do objeto em Newtons

6.3 – Coeficiente de atrito dinâmico

O coeficiente de atrito dinâmico, μ_d , é um valor escalar utilizado para determinar a força de atrito contrária ao movimento de um objeto, de um determinado material, em uma superfície conhecida

A força F , poderá ser definida pela equação

$$F = \mu_d \cdot N \quad [6.4]$$

onde N é a reação normal ao peso do objeto em Newtons

6.4 – Coeficiente de atrito de rolamento

Quando um corpo rola em uma superfície, tanto o corpo quanto a superfície podem se deformar para fazer oposição ao movimento de rolamento. Isso geralmente é representado como um torque aplicado a cada um dos corpos como na Figura 6.1:

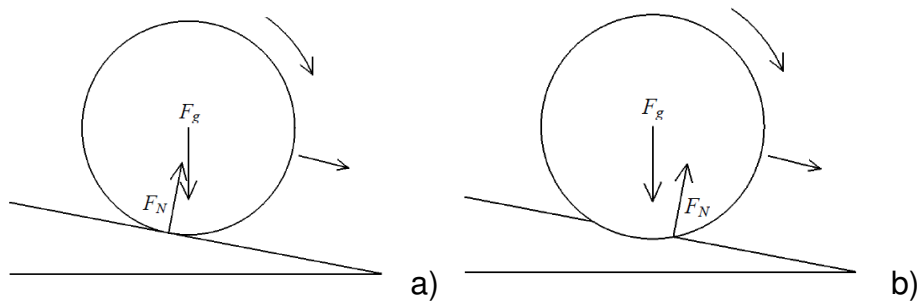


Figura 6.1 – Diagrama mostrando o par de forças que determina o torque de atrito, onde F_N é a força de reação agindo sobre o objeto do plano e F_g é a componente normal do peso do objeto. O coeficiente de atrito de rolamento é o braço do par de forças. a) baixo atrito de rolamento; b) alto atrito de rolamento.

(DEM SOLUTIONS, 2008)

O coeficiente de atrito de rolamento, μ_r , um valor escalar é usado para determinar qual é o torque necessário que deve ser aplicado a um objeto de um determinado material em repouso sobre uma superfície plana para colocá-lo em movimento.

O coeficiente de atrito de rolamento é definida como:

$$\mu_r = \frac{t}{WR} \quad [6.5]$$

onde t é o torque necessário para gerar o rolamento, W é o peso do cilindro e R curvatura local no ponto de contato.

III – AJUSTE DO MODELO

Neste capítulo será apresentado o ajuste e calibração do modelo DEM proposto para aplicação ao processo de lavagem do composto PE/Al decorrente do processo de reciclagem de embalagens cartonadas assépticas.

O passo a passo deste ajuste será detalhado, partindo da determinação das propriedades físicas dos materiais envolvidos e suas interações, passando por simulações de ajustes destas propriedades e considerações importantes feitas com respeito ao desenvolvimento do modelo. Ao final, ter-se-á um modelo completo de propriedades e parâmetros para aplicação em simulações do processo industrial implementado.

7. O Processo

7.1 – Introdução

No item 1.2.2.2.2 deste trabalho foram apontados os diferentes processos industrialmente implantados no Brasil para a reciclagem do composto de PE/Al proveniente da reciclagem de embalagens cartonadas assépticas. Como mostrado no fluxograma das operações envolvidas nestes processos (Figura 1.15) em dois deles, na reciclagem para fabricação de *pellets* e a reciclagem via tecnologia de plasma, tem-se a necessidade de um processo de lavagem para que o residual de fibra de celulose seja separado em razão do mesmo comprometer a qualidade do produto final obtido em ambos os processos. O estudo deste processo mecânico de lavagem será o objeto de estudo deste trabalho.

7.2 – O Composto PE/Al

O composto PE/Al é o resultado da primeira etapa de reciclagem das embalagens cartonadas assépticas conforme descrito no item 1.2.2.2. Os três compostos característicos deste material são: polietileno de baixa densidade na forma de película plástica, alumínio em folha e resíduos de celulose. A Figura 7.1 apresenta em detalhe este material:



Figura 7.1 – Amostra do composto de PE/Al
(CETEA, 2009)

7.3 – Equipamento lavador centrífugo em batelada

Na Figura 7.2 temos detalhes deste equipamento centrífugo de lavagem.

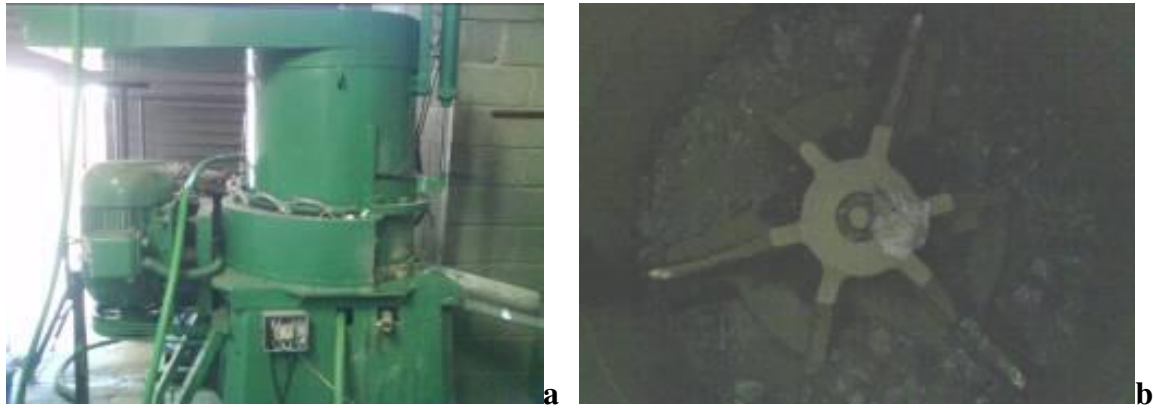


Figura 7.2 – Lavador centrífugo - a) Visão geral do equipamento. b) Detalhe do rotor

O equipamento lavador centrífugo consiste de um corpo cilíndrico vertical no qual ao fundo tem-se um rotor responsável por impelir movimento ao material enquanto bicos localizados nas paredes do equipamento injetam água de modo que esta se misture ao material e ajude na remoção das fibras de celulose. A água junto com as fibras é removida continuamente através de uma tela perfurada na lateral do cilindro. Este equipamento, da maneira como foi descrito, já vem sendo usado industrialmente para esta finalidade.

A batelada no lavador centrífugo começa pelo acionamento do rotor e pela abertura da alimentação de água dos bicos na base do equipamento, logo abaixo do rotor. Esta água é retirada continuamente pelas paredes laterais perfuradas. Em seguida faz-se a alimentação do composto PE/Al no interior do equipamento, deixando o material sob agitação por cerca de 3 minutos. Neste tempo, a agitação mecânica e a água se encarregam de desprender as fibras celulósicas residuais do composto PE/Al. Estas fibras são retiradas, também, pelas paredes laterais misturadas à água. Ao final dos 3 minutos, é fechada a alimentação de água para secar o material e em seguida é aberta uma saída lateral por onde todo o composto PE/Al é arremessado pela força do rotor para fora do equipamento. A saída lateral é, então, fechada e o equipamento está pronto para o início de outra batelada.

7.4 – Benefícios do processo de lavagem do composto PE/Al

No caso da fabricação de *pellets* o residual celulose que fica no composto PE/Al depois da primeira etapa de reciclagem das embalagens cartonadas assépticas, se não fosse retirado, queimaria durante o processo de extrusão, gerando cinzas e gases que afetariam a qualidade destes *pellets*.

Já no caso da reciclagem via tecnologia de plasma, o residual de celulose teria suas cadeias quebradas no reator sendo convertidas em contaminantes do composto parafínico (por exemplo, alcatrão) afetando também sua qualidade deste composto e limitando suas aplicações industriais.

8. O modelo DEM

8.1 – Introdução

O software EDEM® foi usado na implementação do modelo DEM. Este é um software comercial desenvolvido pela empresa *DEM Solutions* para simulações de processos utilizando o Método dos Elementos Discretos (DEM). Com uma interface amigável de fácil assimilação, conta com rotinas e modelos para o ajuste das forças e contatos entre partículas e geometrias já previamente programados. O usuário pode implementar seu processo, importando geometrias de softwares CAD, dando a elas movimentos e proporcionando a interação com partículas de diferentes formas e materiais e, assim, avaliar os resultados obtidos.

8.2 – Modelo da partícula

Nesse trabalho as partículas serão a representação do composto PE/Al. Este composto tem o aspecto de um filme plástico, com uma espessura bem pequena, na casa de milésimos de milímetro, e com largura e altura bem maiores e aleatórias, na casa de centímetros.

Para o modelo DEM desenvolvido é possível editar as partículas com que se queria trabalhar partindo sempre de esferas. Uma esfera tem uma única dimensão definida, o seu raio. Para esta simulação poder-se-ia fazer uma composição com diversas esferas com seu raio na dimensão da espessura do composto PE/Al, de modo a retratar o material tal qual ele se apresenta. Contudo, isto implicaria na utilização de milhões de esferas para simular as quantidades de material reais usadas no lavador industrial, tornando impossível a obtenção de qualquer resultado prático devido ao tempo e a capacidade computacional necessários.

Por se tratar da primeira tentativa de simulação deste processo optou-se por aproximar o composto PE/Al diretamente por esferas simples, de modo que o conjunto dessas esferas na simulação fosse representativo de todo composto que se encontra em processamento pelo equipamento. Este conjunto também inclui a água e as fibras, sendo considerados como se fossem um único material. Também por uma simplificação do

modelo, a entrada e saída de água e fibras não serão consideradas nas simulações, apenas a agitação e movimentação do material no interior do equipamento.

Feitas estas considerações, é preciso encontrar a dimensão desta partícula que retrate a dinâmica do funcionamento do lavador que está sendo simulado e seja compatível com a capacidade computacional disponível. Esta discussão sobre a dimensão da partícula será retomada posteriormente no item 8.9.

8.3 – Geometria do lavador

A geometria do lavador é bastante simples sendo composta por duas áreas distintas:

- Parte estática: Corpo cilíndrico do equipamento, não possui qualquer tipo de movimento.
- Rotor: Parte móvel de rotação constante. É responsável por impelir movimento ao material.

As dimensões físicas utilizadas neste trabalho foram de um equipamento industrial real em operação, o qual também foi usado para os testes e comparação do modelo proposto. A Tabela 8.1, apresenta as dimensões de um lavador usado industrialmente:

Tabela 8.1 – Principais Dimensões físicas do lavador centrífugo

Dimensões do lavador	Valor	Unidade
<i>Altura</i>	0,98	[m]
<i>Diâmetro</i>	0,71	[m]
<i>Altura da peneira de saída</i>	0,27	[m]
<i>Diâmetro do rotor</i>	0,56	[m]
<i>Altura do rotor</i>	0,25	[m]

Uma vez tendo as dimensões, foram implementados os desenhos em 3D do rotor e da parte estática usando o software ANSYS Workbench ®. A Figura 8.1 apresenta detalhes da parte estática e do rotor do equipamento.

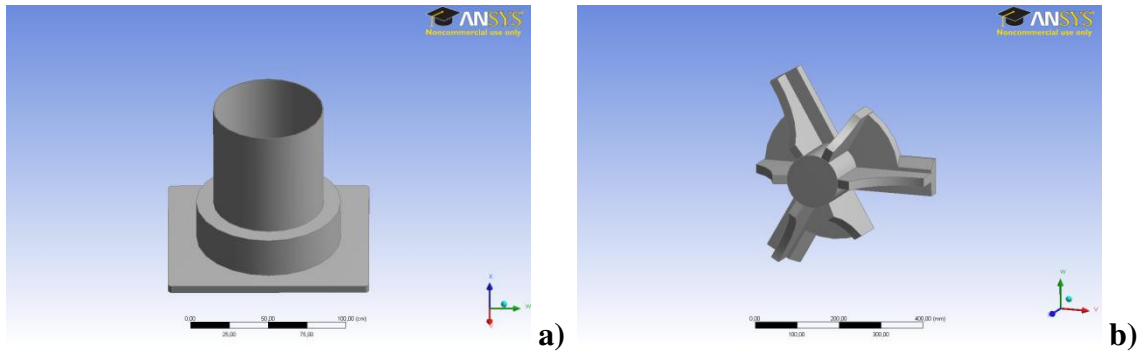


Figura 8.1 – Geometria do equipamento lavador a) Parte estática b) Rotor

8.4 – Modelos de contato

Com base nas informações de cada modelo de contato e de simulações de teste feitas, adotaremos os seguintes modelos de contato.

- Modelo de Contato *Linear Spring*: Para as interações partícula-geometria, tomando como velocidade característica para o processo a velocidade da extremidade do rotor.
- Modelo de Contato *Hertz-Mindlin*: Para as interações partícula-partícula.

8.5 – Propriedades físicas e interações

Para cada material, seja em uma partícula ou em uma geometria, utilizada em uma simulação no EDEM® tem-se a necessidade das seguintes propriedades físicas:

- Módulo de cisalhamento
- Coeficiente de Poisson
- Massa específica

Além destas propriedades físicas, também é necessário estabelecer as interações entre cada material dadas pelos parâmetros:

- Coeficiente de restituição
- Coeficiente de atrito estático
- Coeficiente de atrito de rolamento

Nesse estudo trabalhou-se com dois materiais: aço carbono e o composto de PE/Al. As interações aço carbono – aço carbono não serão necessárias, pois não existirá nas simulações interações entre elementos deste material, visto que este está presente somente nas geometrias. Sendo assim serão necessárias às seguintes propriedades e interações, relacionadas nas tabelas 8.2 e 8.3:

Tabela 8.2 – Parâmetros para implementação do modelo DEM : Propriedades físicas

Propriedade física	Material	Unidade
Módulo de Cisalhamento	Aço Carbono	[MPa]
Coeficiente de Poisson	Aço Carbono	-
Massa Específica	Aço Carbono	[kg/m ³]
Módulo de Cisalhamento	Composto PE/Al	[MPa]
Coeficiente de Poisson	Composto PE/Al	-
Massa Específica	Composto PE/Al	[kg/m ³]

Tabela 8.3 – Parâmetros para implementação do modelo DEM : Propriedades de interação entre os materiais

Interação	Material	Material
Coeficiente de Restituição	Aço Carbono	Composto PE/Al
Coeficiente de Restituição	Composto PE/Al	Composto PE/Al
Coeficiente de Atrito Estático	Aço Carbono	Composto PE/Al
Coeficiente de Atrito Estático	Composto PE/Al	Composto PE/Al
Coeficiente de Atrito de Rolamento	Aço Carbono	Composto PE/Al
Coeficiente de Atrito de Rolamento	Composto PE/Al	Composto PE/Al

8.6 – Propriedades físicas do aço carbono

As propriedades físicas do aço carbono necessárias (módulo de cisalhamento, coeficiente de Poisson, e massa específica) estão disponíveis no banco de dados que consta no software EDEM® e estão apresentadas na Tabela 8.20, ao final do capítulo.

8.7 – Propriedades físicas do composto PE/Al

8.7.1 – Massa específica

A determinação da massa específica do composto PE/Al foram realizadas por técnicos dos laboratórios do CETEA, Centro de Tecnologia em Embalagem de Alimentos, na cidade de Campinas/SP, e foram apresentadas através do Relatório A075-1/09 – Caracterização de Estruturas para reciclagem (CETEA, 2009).

A massa específica do composto de PE/Al foi determinada pelo método do deslocamento, baseado na norma ASTM D 792-08 (ASTM, 2008a). Nesse método, a determinação da massa específica do material é feita através da imersão de uma amostra de peso conhecido do material em um volume conhecido líquido, tomando como base a perda de peso do líquido, utilizando para isso o sistema mostrado na Figura 8.3.



Figura 8.2 – Sistema de ensaio para determinação de massa específica aparente. (CETEA, 2009)

Nos testes conduzidos pelo CETEA foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 8.4:

Tabela 8.4 – Valores obtidos para a massa específica real do composto de PE/Al.

	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Média	Desvio Padrão
Massa específica Real [kg/m ³]	1640	1750	1140	1510	325

(CETEA, 2009)

Foi obtido um desvio padrão de cerca de 22% com relação a média das massas específicas. Era esperada uma variação deste tipo visto que o primeiro processo de reciclagem agride de forma desigual as amostras do composto de PE/Al causando descontinuidades na quantidade do metal presente no composto como observa-se na figura 8.4. Como a massa específica do alumínio é superior a do polietileno uma pequena variação na quantidade do metal na amostra é responsável pela variação da massa específica real da mesma.

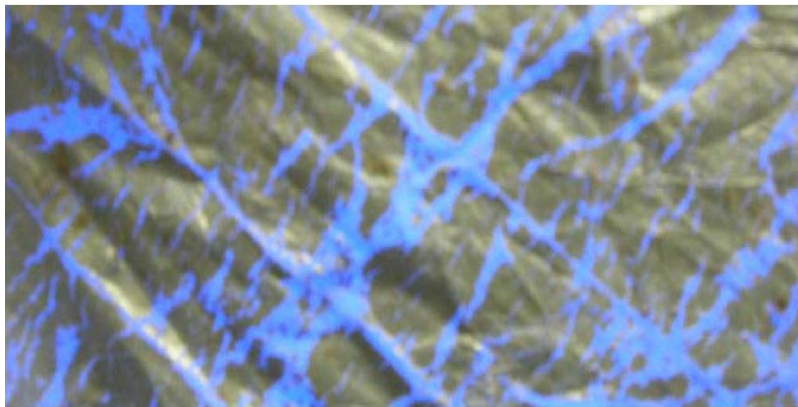


Figura 8.3 – Descontinuidade da camada de alumínio da amostra do composto de PE/Al através de registro fotográfico com estereomicroscópio Olympus, operado com aumento de 18 vezes.

(CETEA, 2009)

8.7.2 – Módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson

Para a determinação do módulo de cisalhamento do composto PE/Al, tem-se que este material é uma composição de dois materiais distintos: alumínio e polietileno de baixa densidade. Através da literatura (KAO-WATER et al., 2004) foram obtidos os coeficientes de Poisson e os módulos de cisalhamento para cada material em separado. Contudo materiais compostos tem o seu módulo de cisalhamento determinado por uma

composição dos módulos dos materiais que o constituem (ASHBY e JONES, 1996) sendo seus limites superior e inferior dado respectivamente por:

$$G_{composto} = f \cdot G_{aluminio} + (1 - f) \cdot G_{polietileno} \quad [8.1]$$

$$G_{composto} = \frac{1}{\left\{ \frac{f}{G_{aluminio}} + \frac{(1-f)}{G_{polietileno}} \right\}} \quad [8.2]$$

Onde:

G é o módulo de cisalhamento

f é a fração de cada material no compósito

Para o caso de filmes finos, novamente a literatura nos traz que f é a proporção entre as espessuras de cada filme (KAO-WATER et al., 2004) . Sendo assim, os módulos de cisalhamento inferior e superior para o composto PE/Al estão relacionados na Tabela 8.5:

Tabela 8.5 – Determinação dos limites inferior e superior para o Módulo de Cisalhamento do composto PE/Al

Material	Módulo de Cisalhamento G [MPa]	Proporção f entre as espessuras dos filmes	Limite superior para o composto PE/Al [MPa]	Limite inferior para o composto PE/Al [MPa]
Filme de Alumínio	13200	6,5%	908,0	57,0
Filme de PE de Baixa Densidade	53	93,5%		

Tomando com referência estes valores, superior e inferior para o módulo de cisalhamento, e tendo o conhecimento prático de que o composto PE/Al tem o comportamento mais próximo ao do filme plástico do que ao do filme de alumínio, optou-se por utilizar o valor médio entre o limite inferior e a média dos dois limites. Este valor foi assumido como $2,7 \cdot 10^2$ MPa.

Nas simulações DEM, por simplicidade do modelo, é considerada somente a deformação elástica das partículas, trabalhando apenas na região elástica da curva tensão-deformação do material, onde o módulo de cisalhamento é constante. Uma abordagem diferente implicaria no cálculo com precisão de uma deformação plástica tendo-se que calcular qual seria a nova forma da partícula, e a nova área de contato (para quando ocorrer colisão entre duas partículas deformadas) exigindo esforços computacional muito maior e inviabilizando a simulação em sistemas com muitas partículas. Outro ponto sobre o módulo de cisalhamento é que, segundo os trabalhos de Chung e Ooi (2007) e Ng (2006), variações do valor do módulo de cisalhamento de até 100 vezes podem ser negligenciadas em simulações DEM, tendo influência somente no tempo computacional e não o balanço de forças. Ng (2006) ainda recomenda a escolha e definição do módulo de cisalhamento em primeiro lugar, e então o ajuste da massa da partícula com base em experimentos, procedimento adotado neste trabalho.

Para o coeficiente de Poisson adotou-se o valor de 0,3, pois ambos os materiais apresentam o mesmo valor para esta propriedade.

8.8 – Propriedades de interação entre os materiais

8.8.1 – Coeficiente de restituição

Serão considerados os coeficientes de restituição aço-carbono / composto de PE/Al e composto PE/Al / composto PE/Al como sendo os constantes no banco de dados do software EDEM ® apresentados respectivamente como as interações aço/plástico e plástico/plástico Este banco de dados foi constituído de por dados de literatura e experimentos práticos realizados pelos desenvolvedores da DEM Solutions ao longo do desenvolvimento do software (DEM SOLUTIONS, 2007b).

8.8.2 – Coeficiente de atrito estático e dinâmico

A determinação do coeficiente de atrito estático e dinâmico do composto PE/Al foram realizadas por técnicos dos laboratórios do CETEA, Centro de Tecnologia em Embalagem de Alimentos, na cidade de Campinas/SP, e foram apresentadas através do Relatório A075-1/09 – Caracterização de Estruturas para reciclagem (CETEA, 2009).

Os coeficientes de atrito estático e dinâmico foram determinados segundo a norma ASTM D 1894-08 (ASTM, 2008b) em uma máquina de ensaio universal *Instron*, modelo 5500R com uma célula de carga de 10 N e velocidade de 150 mm/min. Para cada amostra ensaiada foi obtido como resultado um gráfico como o mostrado na Figura 8.4 que permite a determinação dos valores desejados.

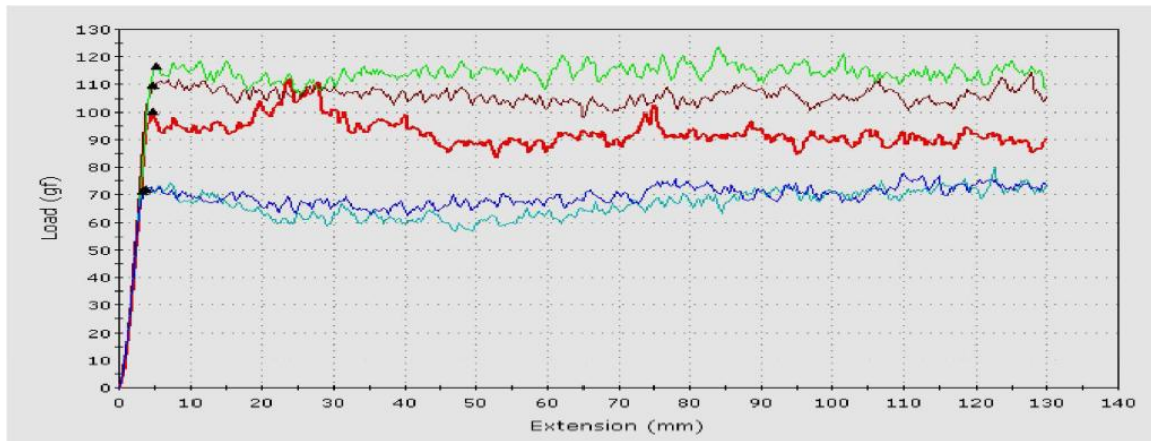


Figura 8.4 – Gráfico de uma das corridas obtidas na máquina de ensaio *Instron* (CETEA,2009)

O objetivo é determinar os valores dos coeficientes de atrito estático e dinâmico entre uma amostra do composto PE/Al e aço carbono, e entre duas amostras do composto de PE/Al. Observa-se que o composto PE/Al possui duas áreas distintas que podem estar expostas durante o processo de lavagem: a face interna, onde não há resíduos de celulose e a face externa onde há a presença destes resíduos. Observa-se também que existem duas direções para contato: a direção longitudinal da embalagem que é sua direção de fabricação e a direção transversal a esta. Fazendo-se a combinação de cada uma dessas faces, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 8.6:

Tabela 8.6 – Resultados para os coeficientes de atrito estático e dinâmico para cada face do material estudado.

Situação de contato	Coeficiente de atrito estático			Coeficiente de atrito dinâmico		
	Média	IV	CV (%)	Média	IV	CV (%)
Face externa (DF) x Face externa (DF)	0,70	0,59 – 0,80	12	0,55	0,49 – 0,63	8,8
Face externa (DF) x Face externa (DT)	0,68	0,58 – 0,78	10	0,54	0,48 – 0,58	6,3
Face interna (DF) x Face interna (DF)	0,47	0,36 – 0,58	16	0,46	0,33 – 0,57	16
Face interna (DF) x Face interna (DT)	0,47	0,25 – 0,60	22	0,46	0,28 – 0,56	21
Face interna (DF) x Face externa (DF)	0,52	0,45 – 0,58	8,1	0,47	0,42 – 0,51	6,6
Face interna (DF) x Face externa (DT)	0,50	0,40 – 0,57	12	0,48	0,40 – 0,52	6,9
Face interna (DT) x Face externa (DF)	0,49	0,42 – 0,56	9,9	0,44	0,35 – 0,49	10
Face externa (DF) x Metal	0,32	0,29 – 0,35	5,7	0,30	0,27 – 0,32	4,8
Face externa (DT) x Metal	0,30	0,27 – 0,32	4,9	0,27	0,24 – 0,28	4,4
Face interna (DF) x Metal	0,31	0,27 – 0,36	7,9	0,28	0,25 – 0,30	5,5
Face interna (DT) x Metal	0,32	0,30 – 0,34	4,4	0,31	0,29 – 0,34	5,9

Valores referentes a 10 determinações
 IV/CV: Intervalo de variação/Coefficiente de variação
 DF/DT: Direção de fabricação/Direção transversal

(CETEA, 2009)

Para a interação composto PE/Al – composto PE/Al foi percebido que não há diferença significativa entre os coeficientes de atrito com relação a direção de contato. Contudo esta diferença existe para as faces interna e externa. Para a interação composto PE/Al – aço carbono esta diferença não foi observada. Como teremos todas as situações e não temos como separá-las será adotada a média aritmética dos coeficientes, sendo esta igual a 0,6 e 0,5, respectivamente, para os coeficientes de atrito estático e dinâmico do composto PE/Al – composto PE/Al e 0,3 para os coeficientes de atrito estático e dinâmico do composto PE/Al – aço carbono.

8.8.3 – Coeficiente de atrito de rolamento

Em busca da determinação do coeficiente de atrito de rolamento para os materiais envolvidos, experimentos foram realizados onde foi comparado o comportamento real do material com simulações do modelo DEM para o experimento.

Uma caixa de 10 cm³ (um cubo com 10 cm de lado) foi cheia com uma quantidade conhecida de material, levada a uma superfície plana, e retirada devagar de modo a deixar o material livre sobre a superfície. Tanto a caixa quanto a superfície onde

foi depositado o material são do mesmo material que compõem a partícula, não havendo, portanto, interações com materiais diferentes neste sistema.

Sem a limitação das paredes da caixa o material se espalhou pela superfície plana, formando uma pilha. Este experimento foi repetido 05 vezes com a mesma quantidade de material, sendo o resultado final de cada repetição fotografado. Para cada foto registrada foram medidos os ângulos de resposta dos lados esquerdo e direito entre o material e a superfície plana. Como tal medida depende do observador para minimizar distorções cada ângulo foi medido em separado três vezes.

Uma vez tendo o experimento real, passou-se a sua implementação no do modelo DEM . Para essa simulação foram necessárias algumas considerações:

- O diâmetro da partícula do material foi estabelecido em 0,007 m.
- A massa específica foi a determinada no item 8.7.1, de 1510 kg/m³.

Com estas considerações a única propriedade que não foi determinada para o material foi o seu coeficiente de atrito de rolamento. Uma vez tendo todo o sistema caracterizado (geometria e partícula), este foi implementado usando um modelo DEM, onde se realizou procedimento similar ao do experimento físico. Após algumas simulações de teste, com base no aspecto visual da simulação estabeleceu-se uma faixa de variação para este coeficiente entre 0,2 e 0,35 para as quais seriam realizados as simulações comparativas. O resultado final foi analisado da mesma maneira. A situação final foi registrada, e os ângulos de resposta direito e esquerdo foram avaliados. Da mesma maneira, para cada ângulo foram feitas 3 medições independentes para minimizar-se o erro do observador. Para cada valor do coeficiente de atrito de rolamento foram refeitas quatro repetições da simulação. Detalhes dos resultados estão apresentados na Figura 8.5.

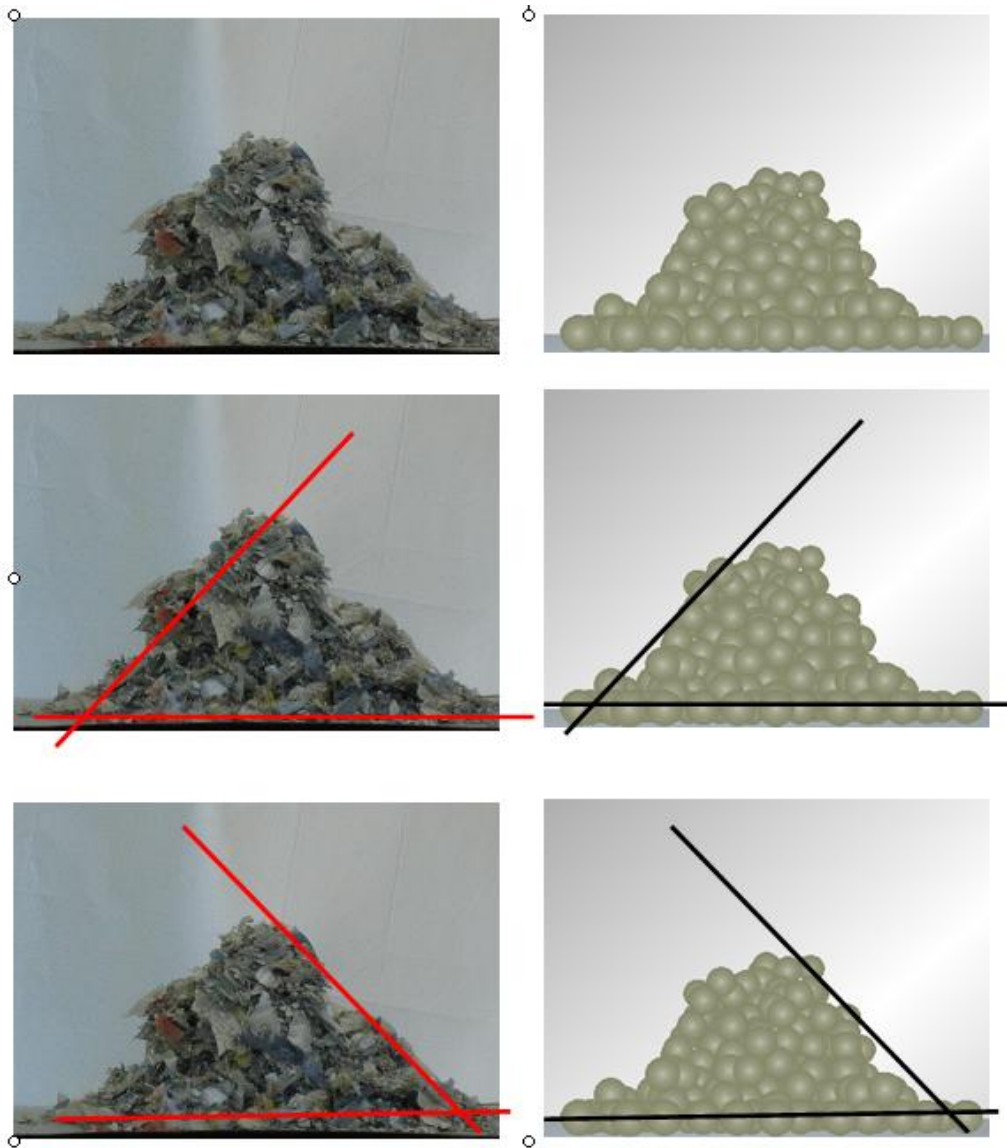


Figura 8.5 – Comparação entre o resultado do experimento real e sua simulação usando um modelo DEM

Mesmo se tratando de um mesmo sistema, é um evento aleatório logo tanto no sistema físico como na simulação foram feitos vários lançamentos e tiradas as médias e o desvio padrão para, então, serem comparadas. Como resultados de cada lançamento temos as Tabelas 8.7 a 8.12 :

Tabela 8.7 – Resultados obtidos com os testes físicos (valores dos ângulos em graus).

	Esquerda			Direita		
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 1	Medida 2	Medida 3
<i>Experimento físico 1</i>	43,0	47,5	41,0	45,5	42,0	44,5
<i>Experimento físico 2</i>	43,5	43,5	45,0	41,5	42,5	40,5
<i>Experimento físico 3</i>	41,5	43,0	45,0	48,0	48,0	45,0
<i>Experimento físico 4</i>	35,5	34,5	35,0	41,5	41,0	40,5
<i>Experimento físico 5</i>	34,5	36,0	37,0	47,0	47,5	44,5
					TOTAL	42,2
					Desvio	4,1

Tabela 8.8 – Resultados obtidos na simulação com o coeficiente de atrito de rolamento (i) igual a 0,200 (valores dos ângulos em graus).

$i = 0,200$	Esquerda			Direita		
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 1	Medida 2	Medida 3
<i>Simulação 1</i>	39,0	44,5	45,0	32,0	33,0	34,5
<i>Simulação 2</i>	38,5	38,0	34,5	36,5	38,5	34,0
<i>Simulação 3</i>	38,5	36,0	37,0	37,5	38,5	39,5
<i>Simulação 4</i>	36,5	33,0	36,0	29,5	31,0	29,5
					TOTAL	36,3
					Desvio	3,9

Tabela 8.9 – Resultados obtidos na simulação com o coeficiente de atrito de rolamento (i) igual a 0,225 (valores dos ângulos em graus).

$i = 0,225$	Esquerda			Direita		
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 1	Medida 2	Medida 3
<i>Simulação 1</i>	41,5	43,0	36,5	33,5	36,0	33,0
<i>Simulação 2</i>	39,0	40,0	39,5	40,5	39,5	43,0
<i>Simulação 3</i>	42,5	41,5	40,0	38,0	40,0	38,0
<i>Simulação 4</i>	38,5	37,5	37,5	40,5	41,0	36,5
					TOTAL	39,0
					Desvio	2,7

Tabela 8.10 – Resultados obtidos na simulação com o coeficiente de atrito de rolamento (i) igual a 0,275 (valores dos ângulos em graus).

i = 0,275	Esquerda			Direita		
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 1	Medida 2	Medida 3
<i>Simulação1</i>	45,5	43,0	45,0	40,5	43,5	43,5
<i>Simulação2</i>	42,5	46,0	42,0	35,0	39,5	39,5
<i>Simulação3</i>	41,0	41,5	42,5	37,0	36,0	35,0
<i>Simulação4</i>	42,5	38,5	42,0	35,5	35,5	36,0
					TOTAL	40,4
					Desvio	3,5

Tabela 8.11 – Resultados obtidos na simulação com o coeficiente de atrito de rolamento (i) igual a 0,300 (valores dos ângulos em graus).

i = 0,300	Esquerda			Direita		
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 1	Medida 2	Medida 3
<i>Simulação1</i>	40,5	51,0	43,0	42,5	40,5	42,5
<i>Simulação2</i>	44,5	45,0	45,5	36,5	37,0	35,5
<i>Simulação3</i>	42,5	44,5	43,5	40,0	39,5	40,5
<i>Simulação4</i>	46,0	43,0	44,5	46,5	41,0	44,0
					TOTAL	42,5
					Desvio	3,5

Tabela 8.12 – Resultados obtidos na simulação com o coeficiente de atrito de rolamento (i) igual a 0,350 (valores dos ângulos em graus).

i = 0,350	Esquerda			Direita		
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 1	Medida 2	Medida 3
<i>Simulação1</i>	42,5	43,0	42,5	42,5	41,0	43,0
<i>Simulação2</i>	46,5	43,0	45,0	48,5	48,0	46,0
<i>Simulação3</i>	49,5	43,5	48,5	48,5	49,0	49,5
<i>Simulação4</i>	44,5	51,5	45,0	46,5	46,5	54,5
					TOTAL	46,2
					Desvio	3,3

Com os resultados das simulações feitas foi construído o gráfico a seguir, Figura 8.6, que apresenta um comportamento linear com $R^2 = 0,98$.

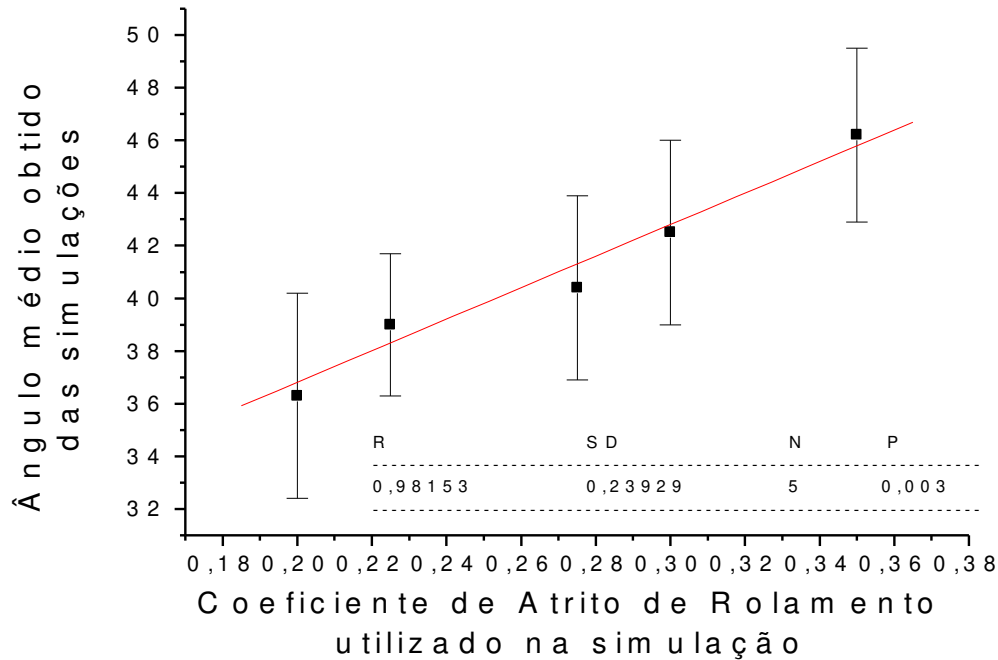


Figura 8.6 – Gráfico do coeficiente de atrito de rolamento vs. Ângulo médio obtido para as simulações do modelo DEM

Comparando com a média dos experimentos físicos tem-se que o valor para o coeficiente de atrito de rolamento que mais retrata a realidade é o valor de 0,3. Fazendo-se o teste de *T-Student* para a hipótese das médias do experimento físico e da simulação serem iguais, obteve-se uma confiança de 76%. Levando-se em conta todas as considerações feitas e erros inerentes a execução e determinação deste parâmetro este grau de confiança foi aceito, e o valor de 0,3 será usado como coeficiente de atrito de rolamento.

O valor obtido para o coeficiente de atrito de rolamento foi para o caso onde tanto a partícula quanto a superfície são constituídas do composto PE/Al. É necessário também o caso onde tem-se uma das superfícies de aço-carbono e outra de PE/Al para completar o modelo. Contudo fazendo-se algumas simulações de teste, constatou-se que outros parâmetros como o raio e a massa específica, que serão alvos de um ajuste mais

rigoroso a ser comentado no capítulo 8.9, são muito mais significativos do que o coeficiente de atrito de rolamento. Por este motivo optou-se por utilizar o mesmo valor de 0,3 para ambas situações.

8.9 – Ajuste da massa específica do composto PE/Al e do raio da partícula

Conforme já mencionado neste trabalho, o composto PE/Al tem como característica ter sua espessura muito menor que suas outras dimensões. Para se fazer a simulação desta situação fielmente usando o modelo DEM teria que ser adotada esta espessura como sendo a dimensão para o raio da partícula, fazendo-se uma composição de esferas de modo a recriar uma amostra do composto PE/Al e multiplicando-se esta amostra para se ter o total em massa necessário ao funcionamento do equipamento. Isto acarretaria a simulação de milhões de partículas e suas complexas interações, o que não seria possível aos recursos computacionais disponíveis e o tempo necessário. Logo ao invés de se retratar o comportamento de cada amostra do composto PE/Al, será retratado o conjunto do material no interior do equipamento. As partículas não mais representarão cada amostra em separado, mas o conjunto delas irá representar a quantidade total do material que é processado pelo equipamento em uma batelada.

Para isso, ajustes serão necessários nas propriedades das partículas utilizadas para a simulação sendo que as duas propriedades que tem mais influência sobre o comportamento do material são o raio da partícula e sua massa específica. Será realizado um processo chamado operação evolucionária, que foi descrito a primeira vez no trabalho de Box e Draper (1969), no qual variações das condições iniciais são feitas de modo a buscar condições mais favoráveis. No caso deste trabalho, buscaremos a menor diferença entre os resultados experimentais e as simulações realizadas.

8.9.1 - Dados experimentais

Uma vez caracterizada a geometria do equipamento, apresentada no capítulo 8.3, foram tomados seus parâmetros operacionais, listados na Tabela 8.13 :

Tabela 8.13 – Parâmetros operacionais do lavador centrífugo: Gerais

Parâmetro Operacional	Valor	Unidade
<i>Quantidade de material por batelada</i>	6	[kg]
<i>Rotação</i>	927	[rpm]
<i>Velocidade da extremidade do rotor</i>	33	[m/s]
<i>Motor instalado</i>	25	[cv]
<i>Eficiência do motor</i>	0,9	-
<i>Fator de potência</i>	0,9	-

Como na simulação não será levada em conta o esforço e consumo de energia para a movimentação do rotor, mas somente a potência dissipada para a movimentação do material serão feitas duas medidas na potência consumida pelo motor do lavador, uma feita com ele girando vazio, e outra com ele carregado para uma batelada. Tais medidas foram tomadas com base na corrente requerida pelo motor, sendo medida no painel elétrico do equipamento e tendo como resultado a Tabela 8.14:

Tabela 8.14 – Parâmetros operacionais do lavador centrífugo: Específicos

Parâmetro medido	Valor	Unidade
<i>Corrente elétrica do equipamento vazio</i>	35,0	[A]
<i>Corrente elétrica do equipamento na batelada</i>	54,0	[A]

Fazendo-se a diferença entre o que é consumido pelo equipamento funcionando vazio e em batelada, e usando as relações abaixo:

$$P_{in} = i \cdot U \cdot 3^{1/2} \cdot FP \quad [8.03]$$

$$P_{out} = P_{in} \cdot eff \quad [8.04]$$

onde

P_{in} = potência de entrada [W]

P_{out} = potência de saída [W]

i = corrente elétrica [A]

U = tensão [V]

FP = fator de potência, adimensional

eff = Eficência do motor, adimensional

tem-se que a potência consumida para a movimentação do material no equipamento é de aproximadamente 5800 W. Usando uma outra relação (JOAQUIM JUNIOR, et al, 2007):

$$P = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau \quad [8.05]$$

onde

P = potência consumida [W]

f = rotação do eixo [Hz]

τ = torque aplicado [N.m]

tem-se que o torque aplicado pelo rotor é de 60 N.m . Sendo assim os parâmetros reais que serão usados para balizar as simulações serão: **Potência dissipada = 5800 W e Torque aplicado = 60 N.m.**

8.9.2 - Simulações de ajuste

Tendo os parâmetros acima definidos, foi proposto o primeiro planejamento de experimento para as duas variáveis escolhidas, raio e massa específica da partícula. Segundo Box e Draper (1969), é recomendado começar com um fatorial completo para dois níveis. Será considerada uma repetição para cada nível e no ponto central.

Como dados de partida foram usados os valores abaixo na Tabela 8.15:

Tabela 8.15 – Primeiro planejamento de experimentos para massa específica e raio da partícula

	Valor Real	Unidade
Massa Específica	1510	[kg/m ³]
	500	[kg/m ³]
Raio	0,01	[m]
	0,007	[m]

Para cada alteração no raio da partícula e em sua massa específica foi calculado um número total novo de partículas no sistema, visto que a massa total por batelada foi mantida constante.

Para o experimento foram feitas duas repetições para cada ponto e duas no ponto central. Como resultados foram analisados a potência dissipada pelas partículas, e o torque médio aplicado no rotor. O planejamento e seus respectivos resultados são apresentados na Tabela 8.16.

Tabela 8.16 – Resultados do primeiro planejamento de experimentos para massa específica e raio da partícula

Massa Específica [kg/m³]	Raio [m]	Potência [W]	Torque [N.m]
1510	0,01	4612	37
500	0,01	5703	52
1510	0,007	4681	31
500	0,007	6248	43
1510	0,01	4292	33
500	0,01	5639	50
1510	0,007	4653	34
500	0,007	6245	38
1000	0,085	5263	39
1000	0,085	4805	41

Observando as tendências das respostas obtidas com as simulações e comparando-as com os dados experimentais obtidos temos que a região onde temos a convergência dos valores de potência dissipada e torque, 5800 W e 60 N.m respectivamente, aconteceriam para regiões onde a massa específica fosse menor que 500 kg/m³ e o raio maior que 0,01 m, como mostrado ilustrativamente na Figura 8.7.

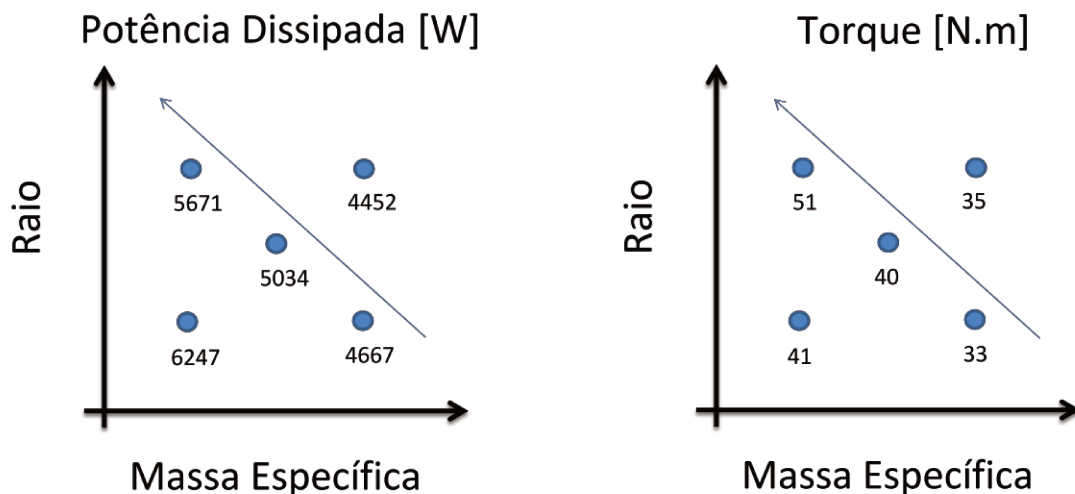


Figura 8.7 – Ilustração das tendências das respostas obtidas para as variáveis potência dissipada e torque para o primeiro planejamento de experimentos.

Com base nessa observação foi sugerido o segundo planejamento, conforme a Tabela 8.17:

Tabela 8.17 – Segundo planejamento de experimentos para massa específica e raio da partícula

	Valor Real	Unidade
Massa Específica	500	[kg/m ³]
	248	[kg/m ³]
Raio	0,012	[m]
	0,010	[m]

Para este segundo planejamento foram mantidas as repetições para cada ponto e para o ponto central. Os resultados são apresentados na Tabela 8.18.

Tabela 8.18 – Resultados do segundo planejamento de experimentos para massa específica e raio da partícula

Massa Específica [kg/m ³]	Raio [m]	Potência [W]	Torque [N.m]
500	0,012	5095	37
500	0,010	6080	52
248	0,012	6071	63
248	0,010	7213	60
500	0,012	4937	42
500	0,010	5733	48
248	0,012	6025	49
248	0,010	6862	53
374	0,011	5240	52
374	0,011	5547	48

Analisando estas últimas respostas, não se teve a convergência das duas variáveis para os valores obtidos experimentalmente dentro do intervalo escolhido ao mesmo tempo, como se pode ver na Figura 8.8.

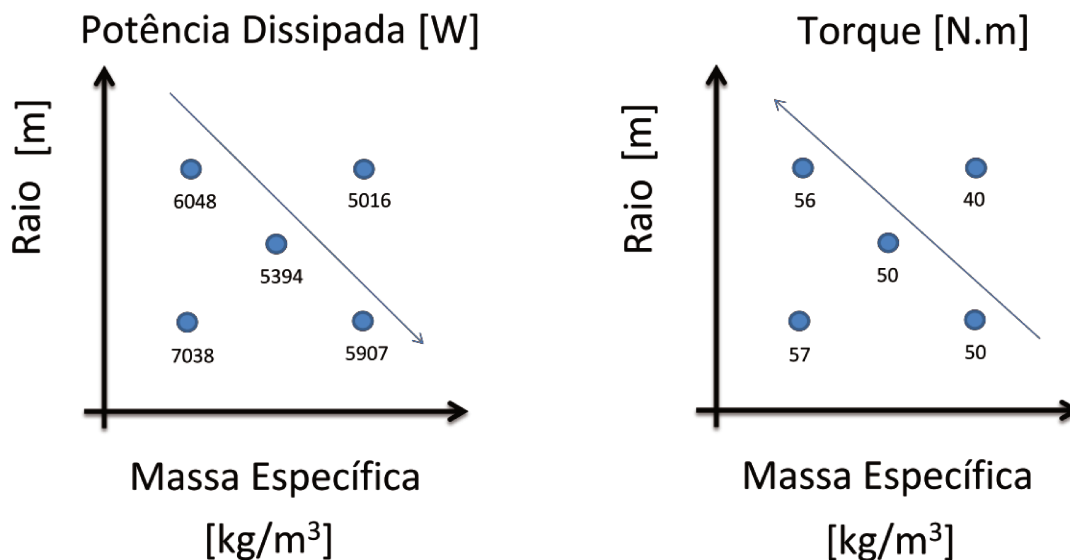


Figura 8.8 – Ilustração das tendências das respostas obtidas para as variáveis potência dissipada e torque para o segundo planejamento de experimentos.

Pelas tendências apresentadas, para se atingir o valor de 5800 W para a potência dissipada ter-se-ia que aumentar a massa específica e diminuir o raio, enquanto para atingir-se o valor de 60 N.m para o torque haveria a necessidade de se aumentar o raio e diminuir a massa específica.

Analisando cada hipótese, nota-se que diminuir a massa específica e aumentar o raio não seria interessante, pois já com estes valores menores para a massa específica o número de partículas aumentou significativamente, e com um raio ainda maior que o usado, os movimentos do material no equipamento não estariam mais recriados, fugindo, assim, do propósito da simulação.

Optou-se, então, por considerar a variável potência dissipada na definição dos parâmetros raio da partícula e massa específica por esta apresentar um ajuste muito próximo ao real e por esta variável ter uma relevância maior para o processo industrial que o torque aplicado. Deste modo o ponto escolhido foi aquele em que o torque fosse o mais próximo do valor experimental, embora com algum erro.

Sendo assim os parâmetros foram definidos como: **raio da partícula igual a 0,01 m e massa específica PE/Al igual a 500 kg/m³**. Com base nos resultados obtidos foi construída a Tabela 8.19:

Tabela 8.19 – Resultados para massa específica igual a 500 kg/m³ e raio da partícula igual a 0,01 m

Massa Específica [kg/m³]	Raio [m]	Potência [W]	Torque [N.m]
500	0,01	5703	52
500	0,01	6080	52
500	0,01	5639	50
500	0,01	5733	48
Média		5789	51

Com base nos resultados da tabela 9.18, tem-se um ajuste quase exato para a potência dissipada e um torque com um erro 15% quando comparados aos valores obtidos experimentalmente.

Com estes valores para massa específica e para o raio da partícula deveria ter se ajustado um novo coeficiente de atrito de rolamento, contudo tomando base algumas simulações testes feitas ainda nas fases preliminares do trabalho a variação do coeficiente de atrito de rolamento frente às variáveis raio da partícula e massa específica não é relevante para as respostas obtidas, sendo esta variação considerada como contida no erro inerente ao ajuste. Para o objetivo de se estudar o comportamento do material e do processo em questão acredita-se que os ajustes e aproximações feitas estão adequadas e permitirão que se atinjam estes objetivos.

Na Tabela 8.20 foram resumidos todos os parâmetros usados para o ajuste do modelo DEM para o lavador centrífugo:

Tabela 8.20 – Resultados do segundo planejamento de experimentos para massa específica e raio da partícula

Propriedade física	Material	Valor	Unidade
Módulo de Cisalhamento	Aço Carbono	$1,0 \cdot 10^4$	[MPa]
Coeficiente de Poisson	Aço Carbono	0,3	-
Massa Específica	Aço Carbono	7850	[kg/m ³]
Módulo de Cisalhamento	Composto PE/Al	$2,7 \cdot 10^2$	[MPa]
Coeficiente de Poisson	Composto PE/Al	0,3	-
Massa Específica	Composto PE/Al	500	[kg/m ³]
Dimensão Geométrica		Valor	Unidade
Raio da Partícula		0,01	[m]
Parâmetro Operacional		Valor	Unidade
Quantidade de material por batelada		6	[Kg]
Frequência de rotação		927	[rpm]
Velocidade da extremidade do rotor		33	[m/s]
Interação	Material	Material	Valor
Coeficiente de Restituição	Aço Carbono	Composto PE/Al	0,5
Coeficiente de Restituição	Composto PE/Al	Composto PE/Al	0,5
Coeficiente de Atrito Estático	Aço Carbono	Composto PE/Al	0,3
Coeficiente de Atrito Estático	Composto PE/Al	Composto PE/Al	0,6
Coeficiente de Atrito de Rolamento	Aço Carbono	Composto PE/Al	0,3
Coeficiente de Atrito de Rolamento	Composto PE/Al	Composto PE/Al	0,3

IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será apresentado uma série de simulações feitas a partir do modelo DEM desenvolvido no capítulo anterior com o objetivo de estudar e entender o processo industrial para o qual foi desenvolvido.

Para isso foram propostos três outros rotores para o equipamento e uma alteração na parte estática, o que totalizará oito situações distintas que serão analisadas e comparadas segundo parâmetros medidos ao longo da simulação.

9. Aplicação do modelo DEM

9.1 – Introdução

Tendo o modelo DEM completo (partícula, geometria e parâmetros operacionais) buscou-se por aspectos que permitiriam entender o funcionamento deste equipamento, tentando relacionar aspectos físicos com as qualidades buscadas ao final do processo. Isto foi feito através de alterações nas geometrias do rotor e na sua parte estática.

Além do rotor utilizado anteriormente para o ajuste do modelo, chamado agora de Rotor 01, foram propostos outros três rotores para serem simulados. A Figura 9.01 mostra detalhes de cada um desses quatro rotores.

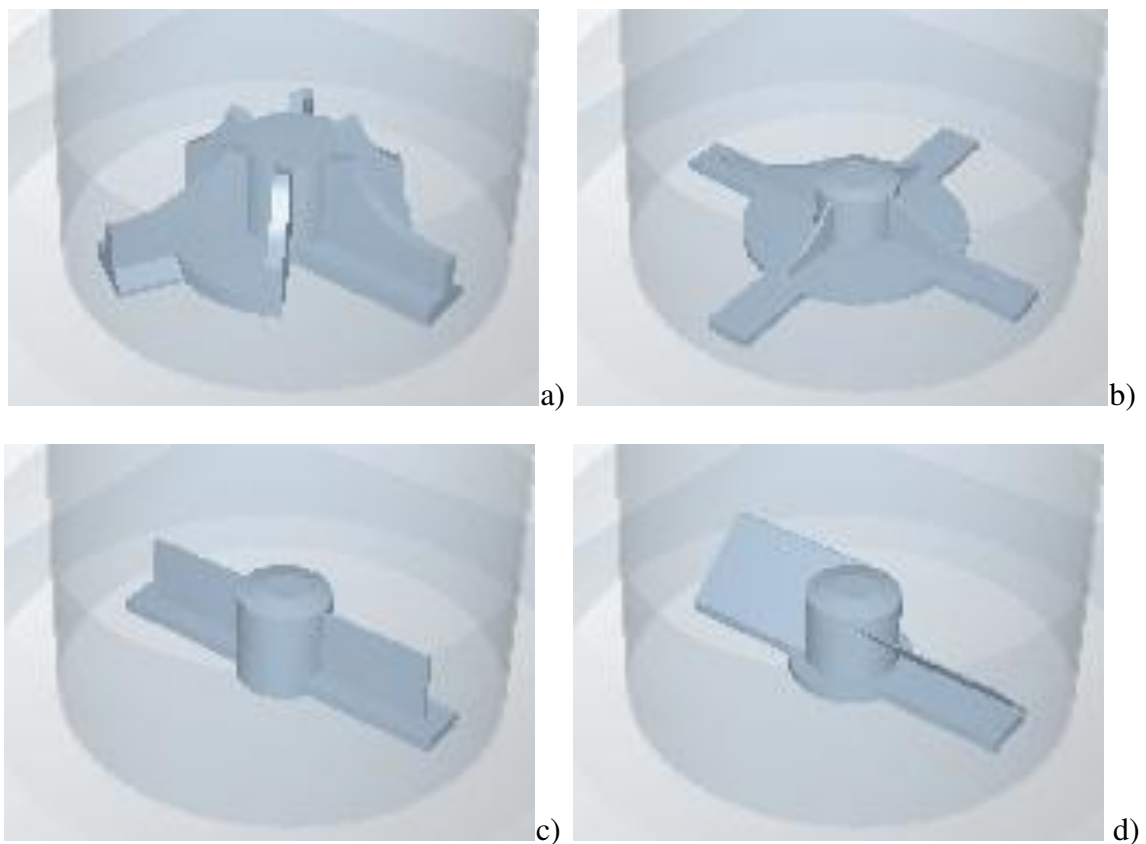


Figura 9.1 – Detalhes dos rotores estudados: a) Rotor 01; b) Rotor 02; c) Rotor 03; d) Rotor 04.

Uma alteração na parte estática com a inclusão de duas chicanas também foi proposta. A Figura 9.2 apresenta todas as geometrias utilizadas.

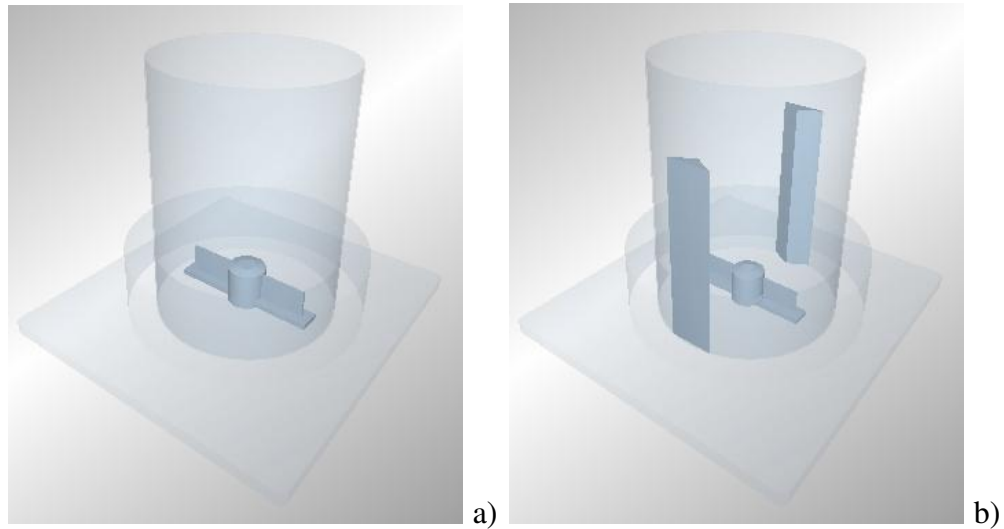


Figura 9.2 – Geometrias estudadas: a) Parte estática sem chicanas. b) Parte estática com chicanas.

9.2 – Parâmetros analisados

Foram realizadas as simulações dos quatro rotores, e das duas opções para parte estática totalizando oito diferentes situações. Em cada uma delas optou-se por analisar as seguintes variáveis:

- **Potência dissipada por colisões:** Potência perdida devido a colisões durante simulação.
- **Torque médio no rotor:** Torque médio a que foi submetido o rotor do equipamento.
- **Velocidade média das partículas:** Velocidade média de todas as partículas do sistema durante a simulação.

- **Velocidade relativa média de colisão das partículas com a parte estática:** Média das velocidades relativa das colisões entre as partículas e a parte estática no terço inferior da parte estática do equipamento.

- **Número de colisões:** Número total de colisões durante 60 segundos de simulação.

- **Tipo de colisões:** Distribuição do número de colisões de acordo com cada tipo: Partícula/Partícula, Partícula/Parte Estática, Partícula/Rotor, Partícula/Chicana.

- **Distribuição da porcentagem de partículas pelo número máximo de colisões:** Número máximo colisões sofridas com o terço inferior da parte estática por determinada porcentagem de partículas do sistema durante 10 segundos de simulação.

- **Energia dissipada por 1000 colisões:** Quantidade de energia dissipada pelo sistema para cada 1000 colisões ocorridas.

Todas as análises terão como base a comparação entre os Rotores 02, 03 e 04 com o Rotor 01, visto que este é o que está sendo usado industrialmente.

9.3 – Resultados

9.3.1 – Resultado gráfico das simulações

Para cada rotor e geometria analisada foram registradas imagens gráficas de instantes destas simulações. Foram usadas duas cores para as partículas para que possa notar a mistura ocorrida entre as partículas durante a simulação. Os resultados estão apresentados nas Figuras 9.3 a 9.10 para cada rotor e geometria em separado. Na Figura 9.11 é apresentado uma comparação de todos os rotores e geometrias para um mesmo instante.

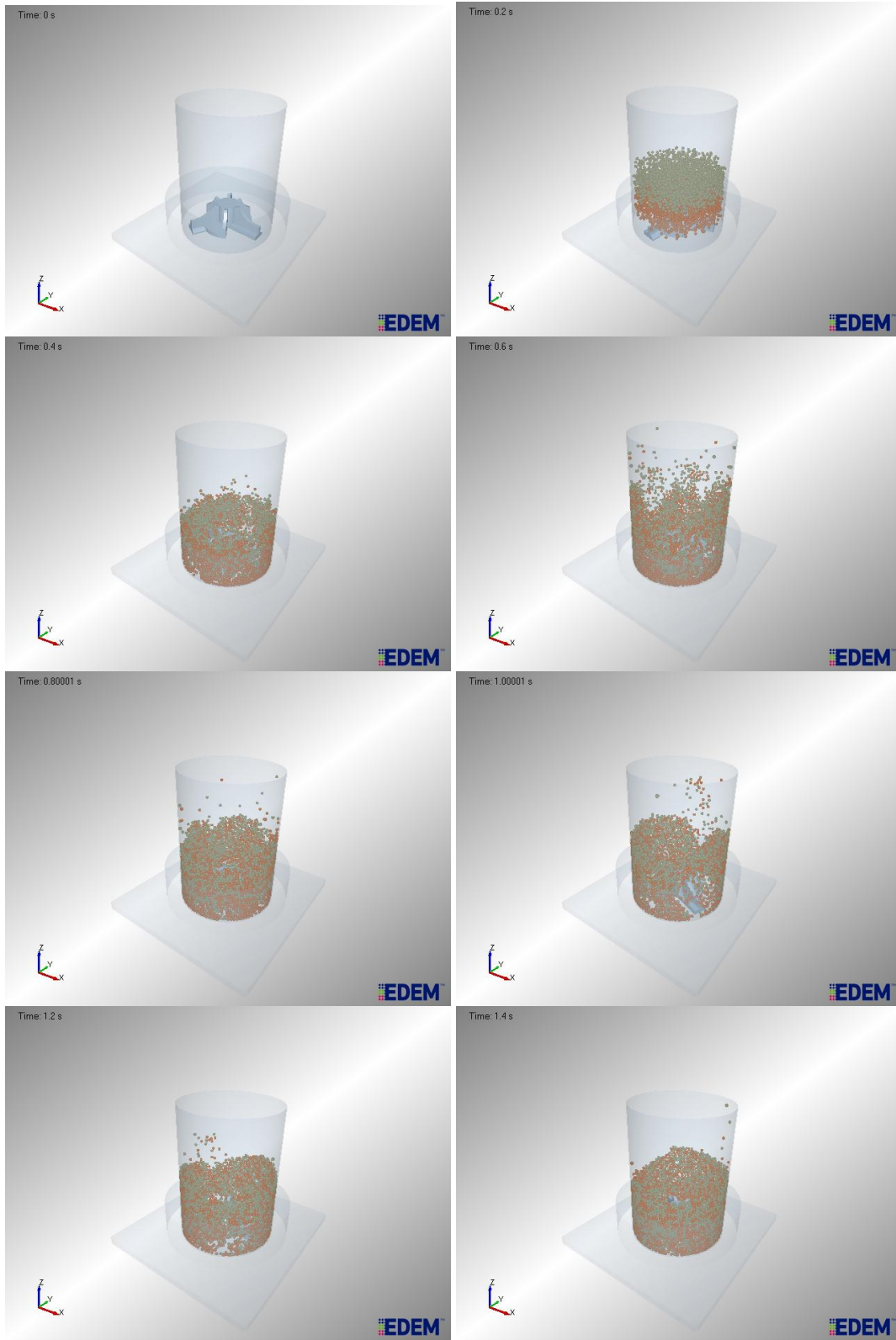


Figura 9.3 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 01 com a geometria da parte estática sem chicanas.

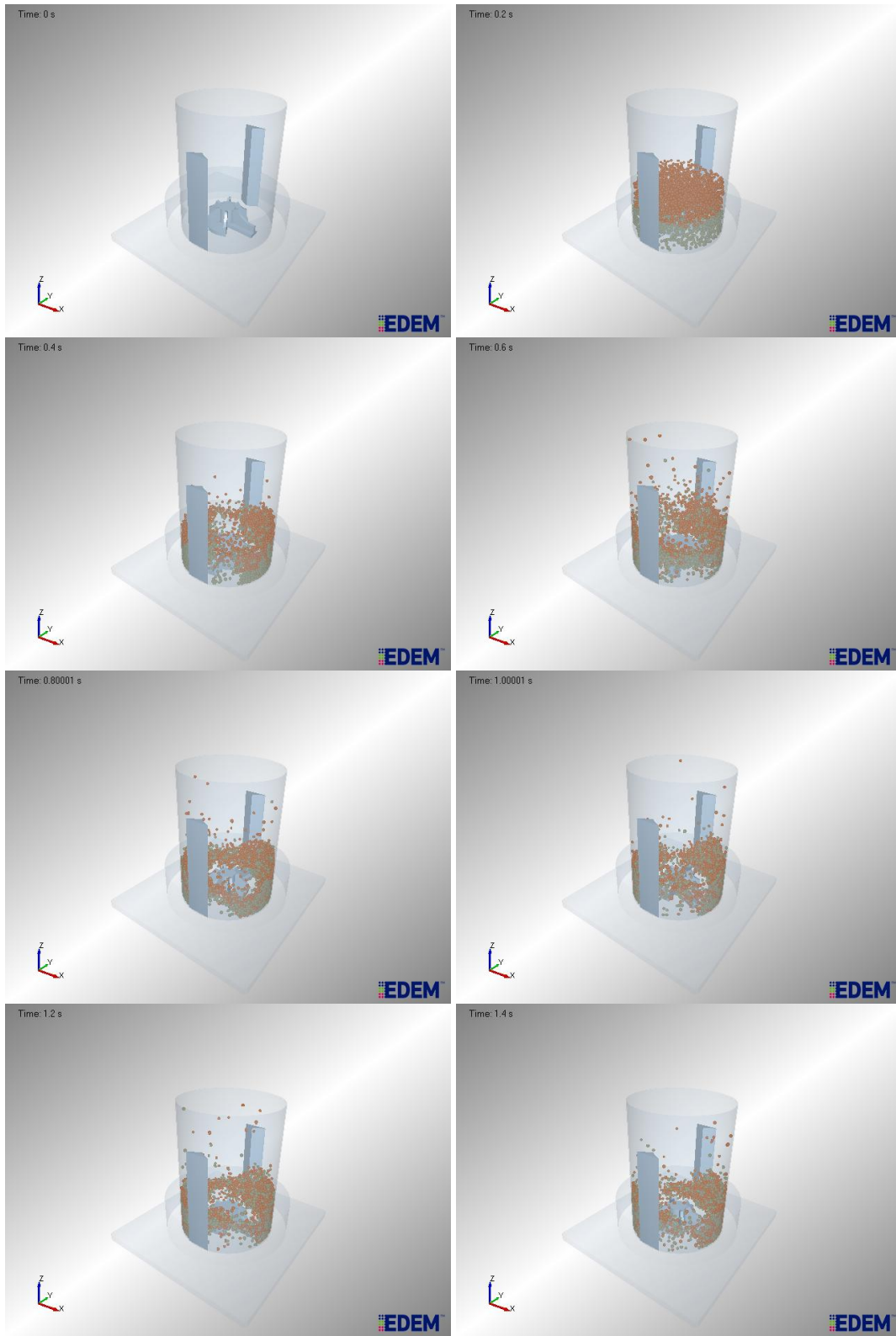


Figura 9.4 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 01 com a geometria da parte estática com chicanas.

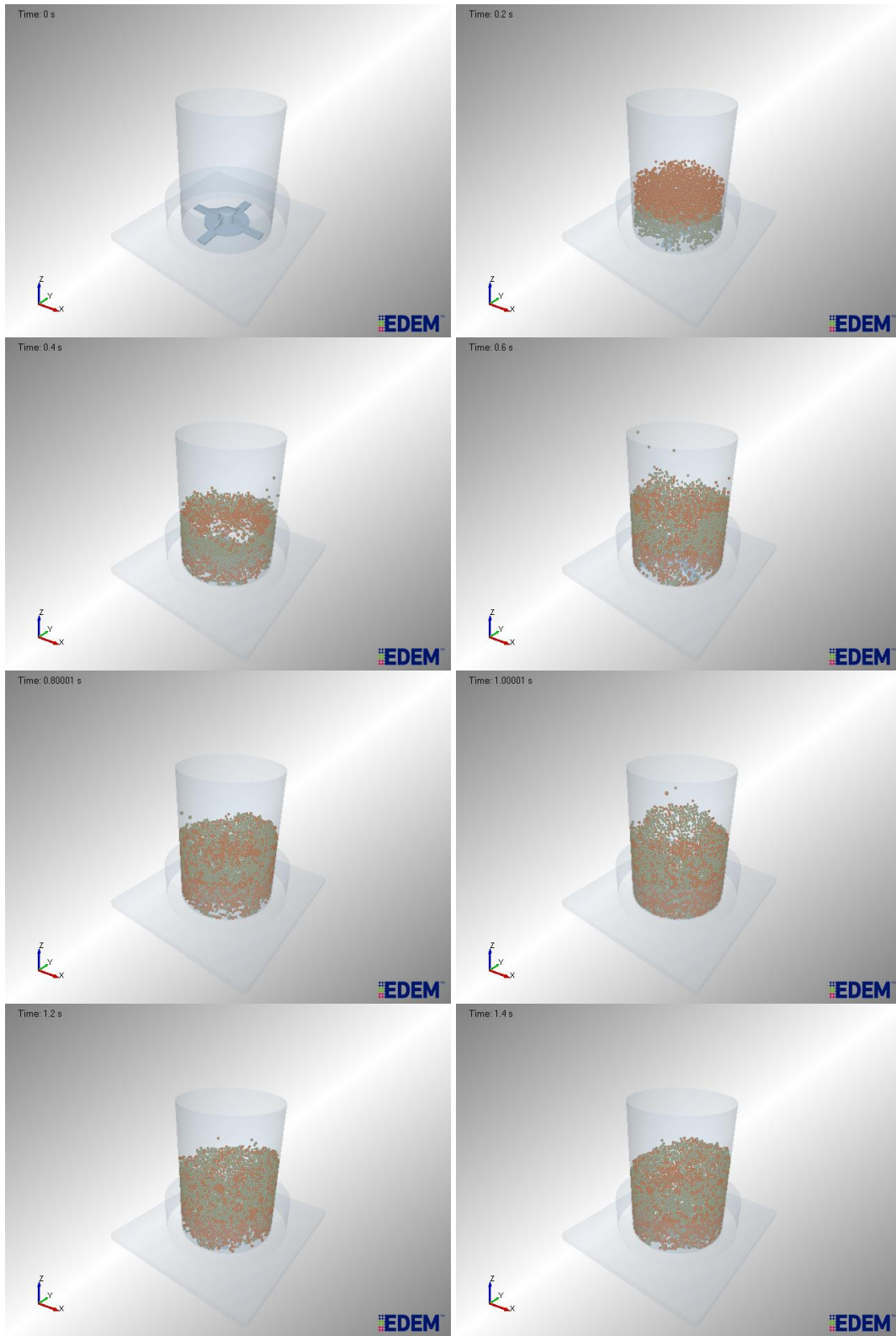


Figura 9.5 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 02 com a geometria da parte estática sem chicanas.

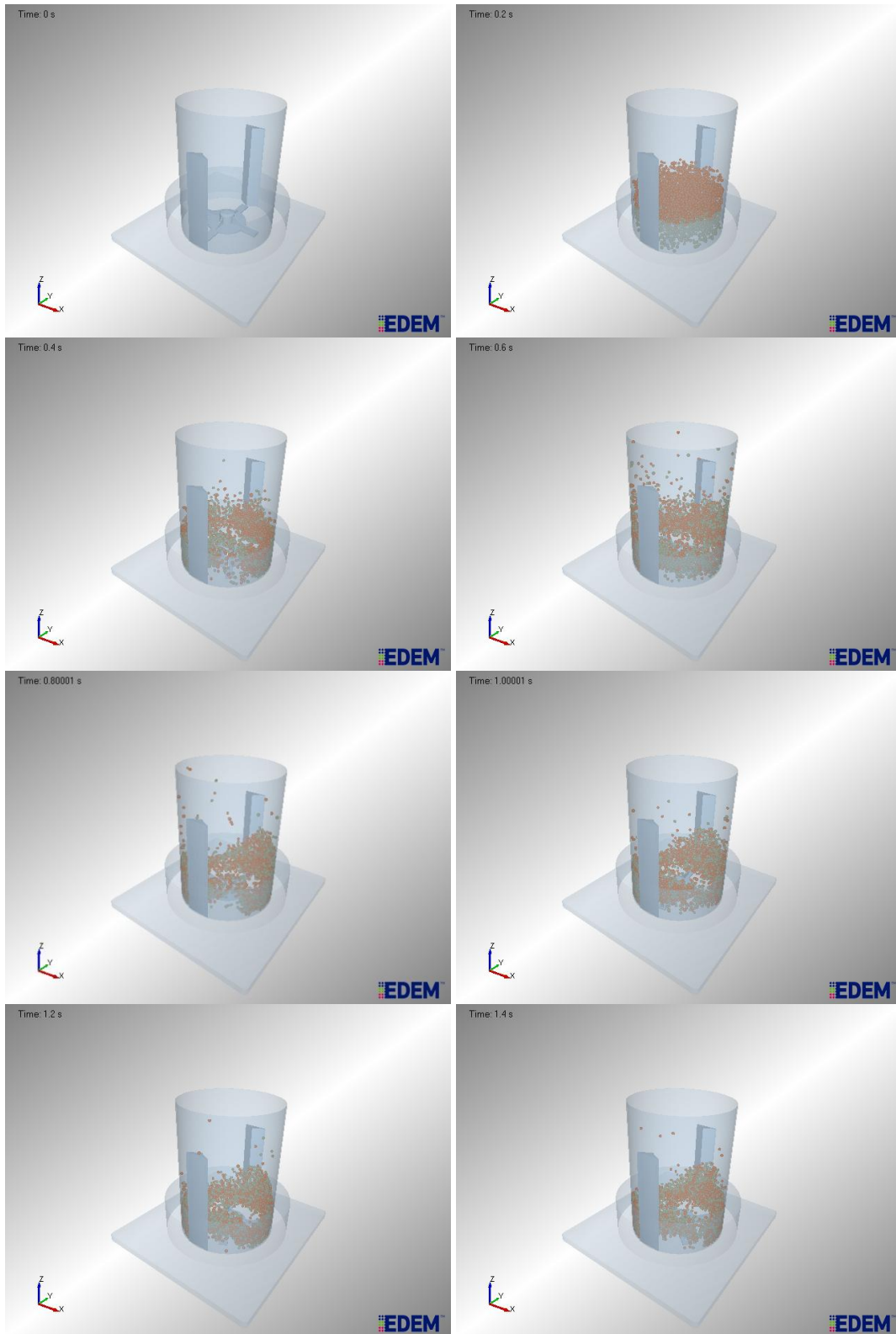


Figura 9.6 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 02 com a geometria da parte estática com chicanas.

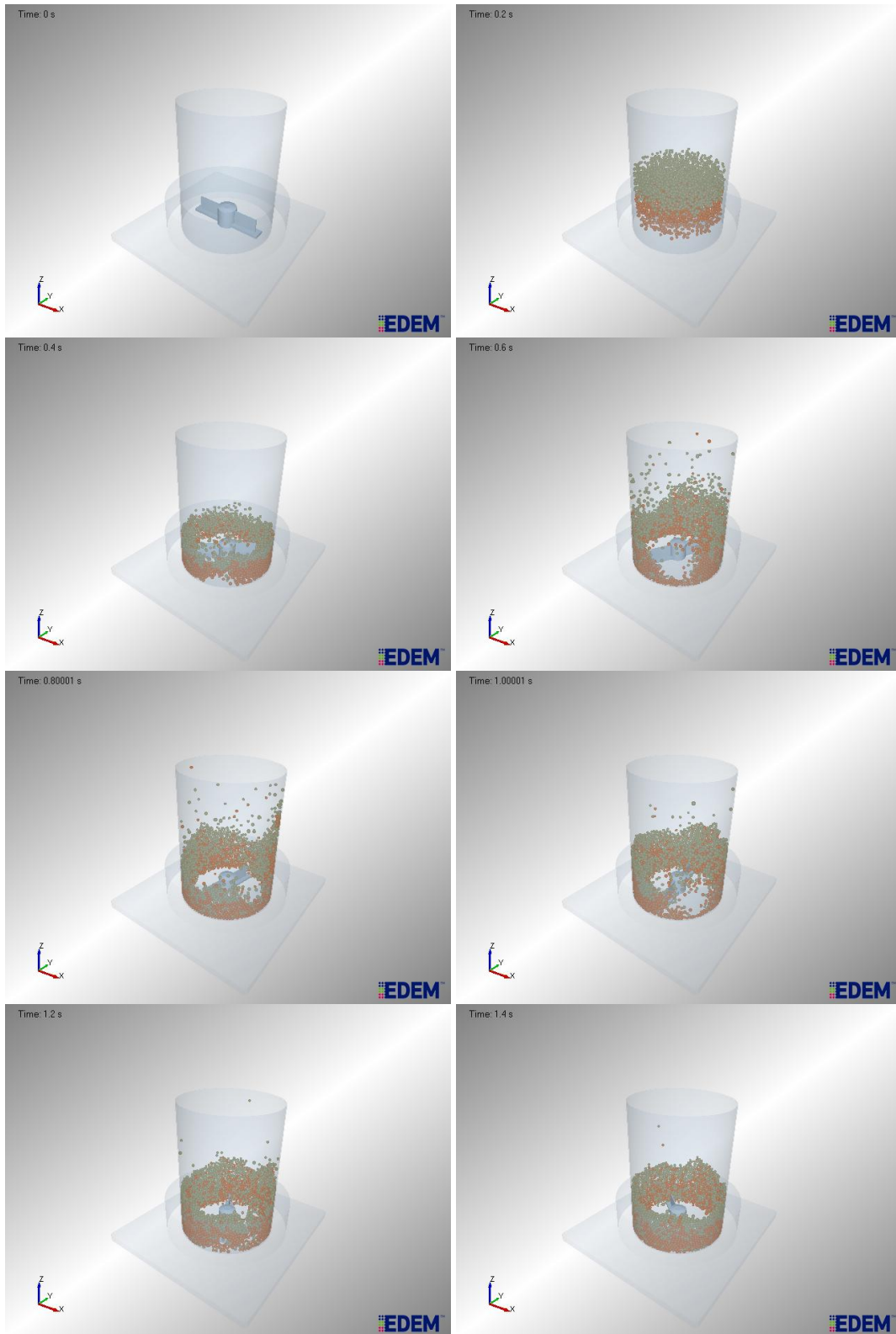


Figura 9.7 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 03 com a geometria da parte estática sem chicanas.

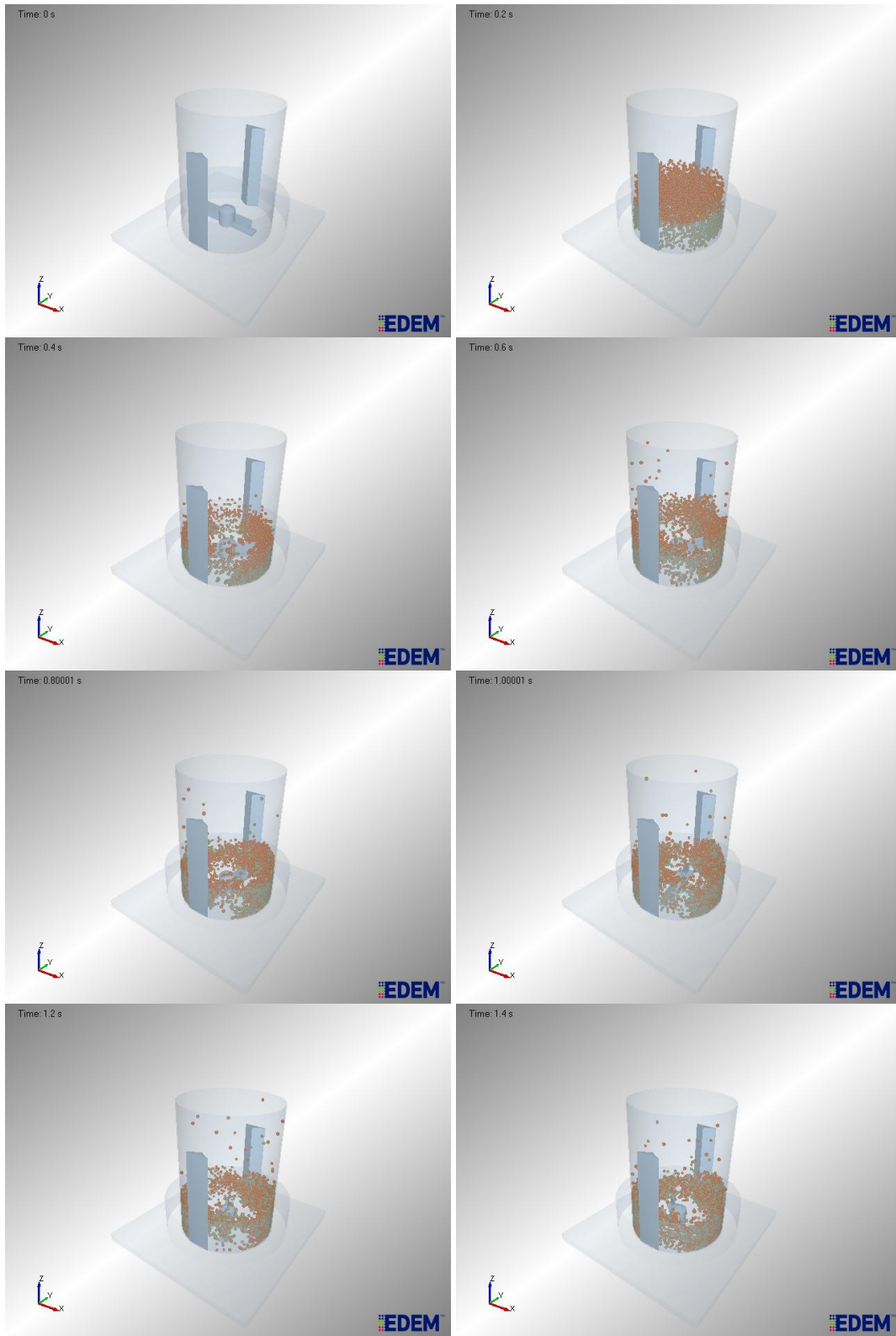


Figura 9.8 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 03 com a geometria da parte estática com chicanas.

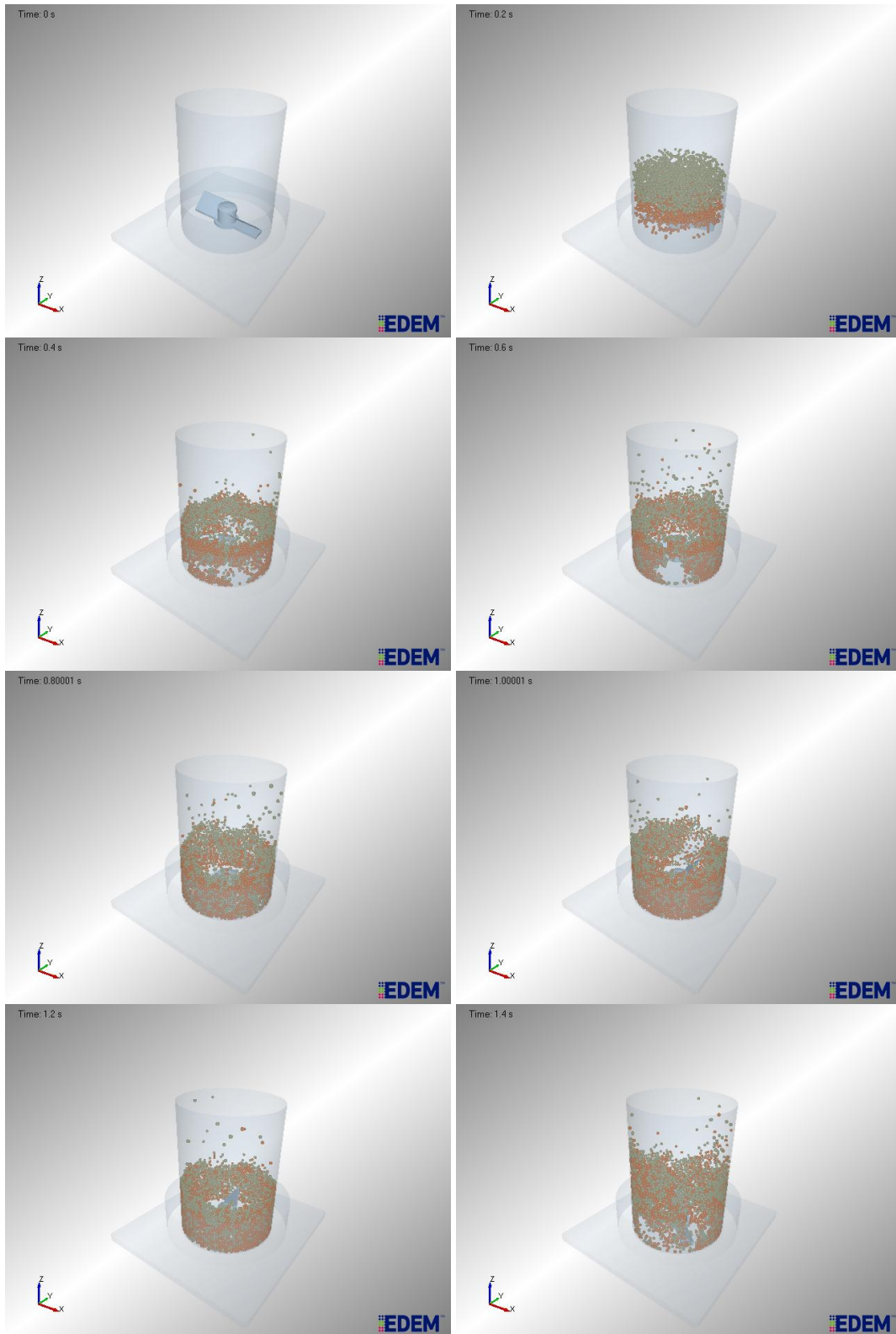


Figura 9.9 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 04 com a geometria da parte estática sem chicanas.

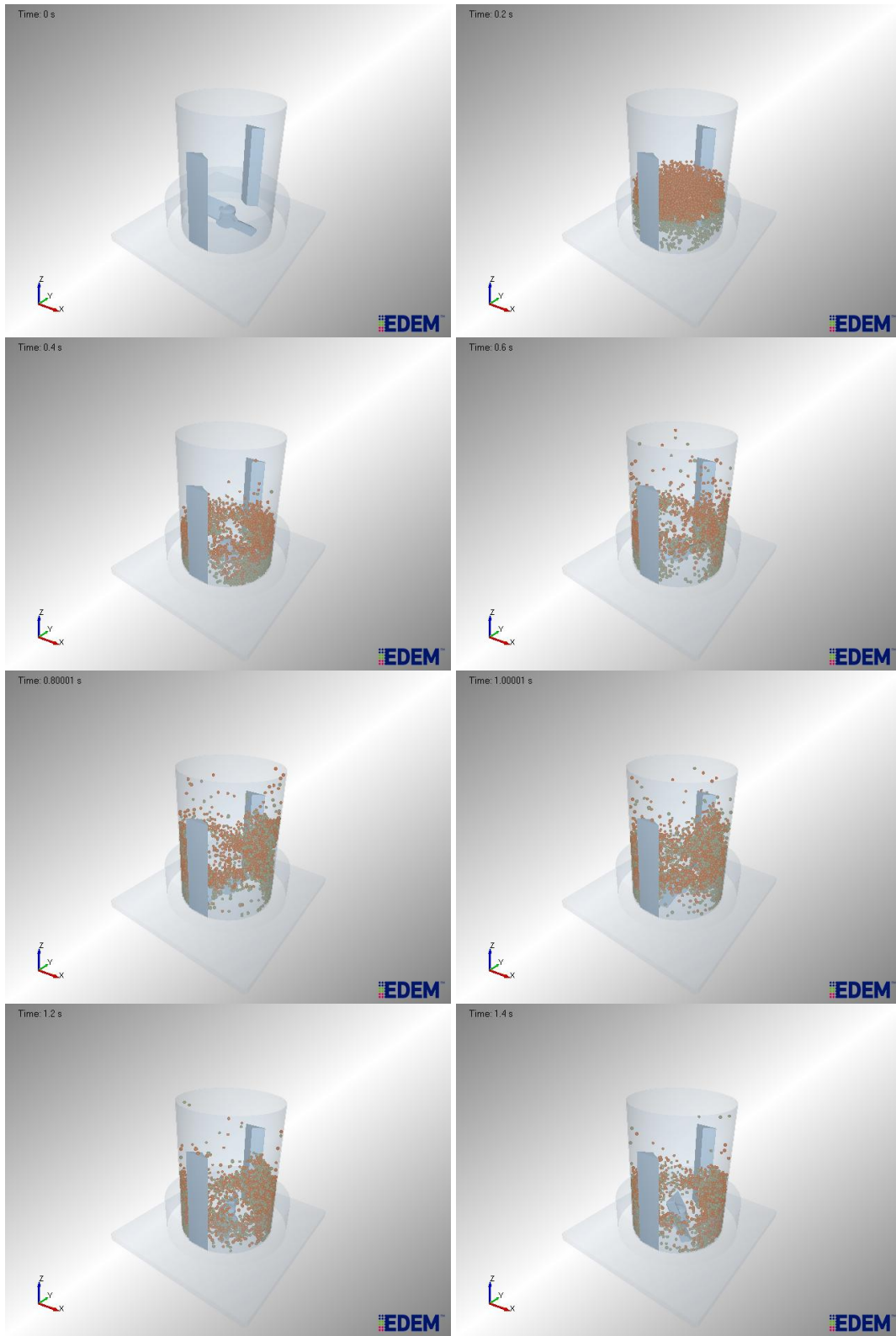


Figura 9.10 – Imagens de diversos instantes da simulação para o Rotor 04 com a geometria da parte estática com chicanas.

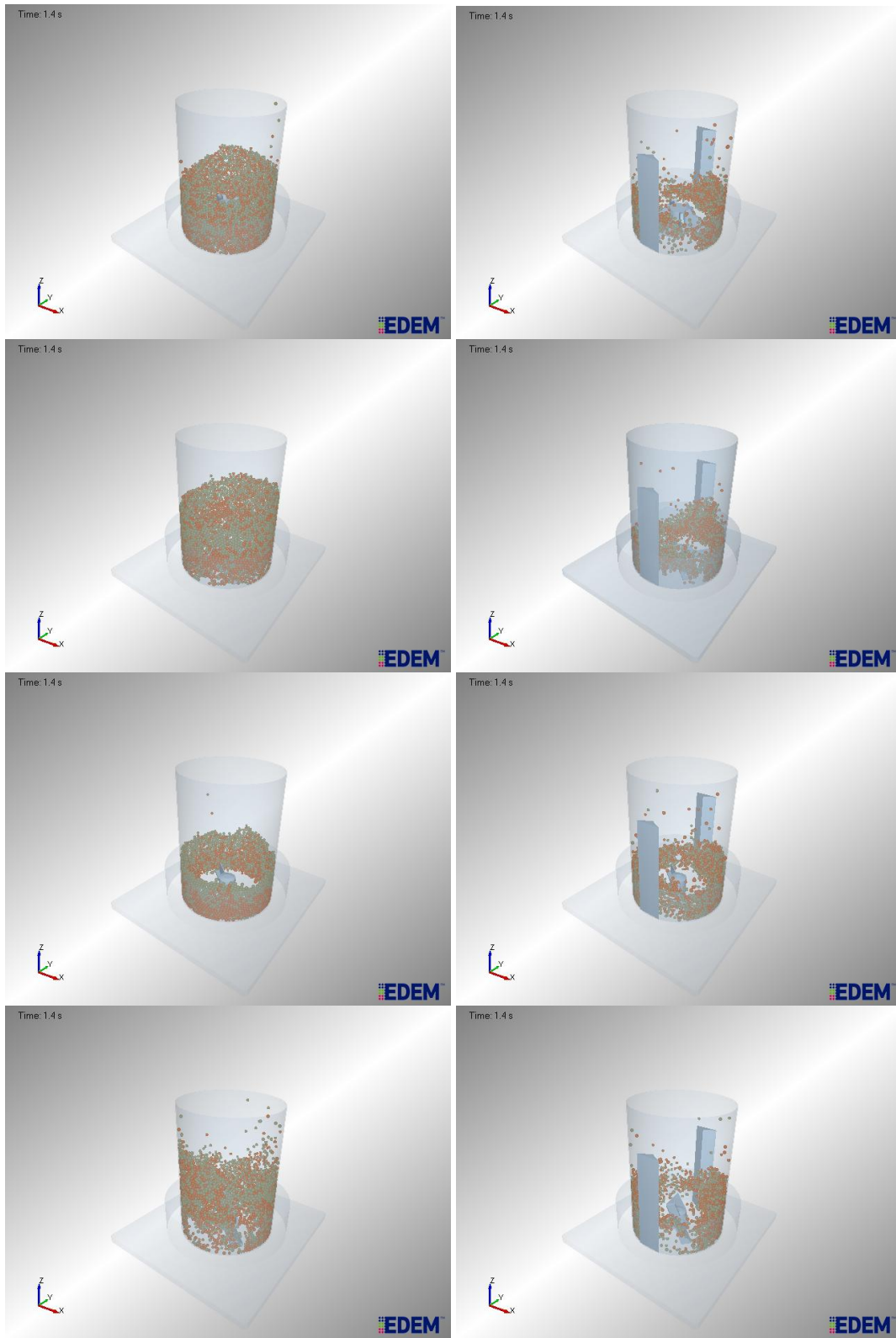


Figura 9.11 – Imagens da simulação dos Rotores 01, 02, 03 e 04 nas geometrias com e sem chicanas respectivamente, no instante $t=1,4$ segundo.

9.3.2 – Potência dissipada por colisões

Da maneira como foi modelada a simulação no modelo DEM toda a dissipação de energia do sistema vem das colisões entre partículas, e entre partículas e geometrias, sendo assim temos a Figura 9.12 mostrando os resultados para este parâmetro.

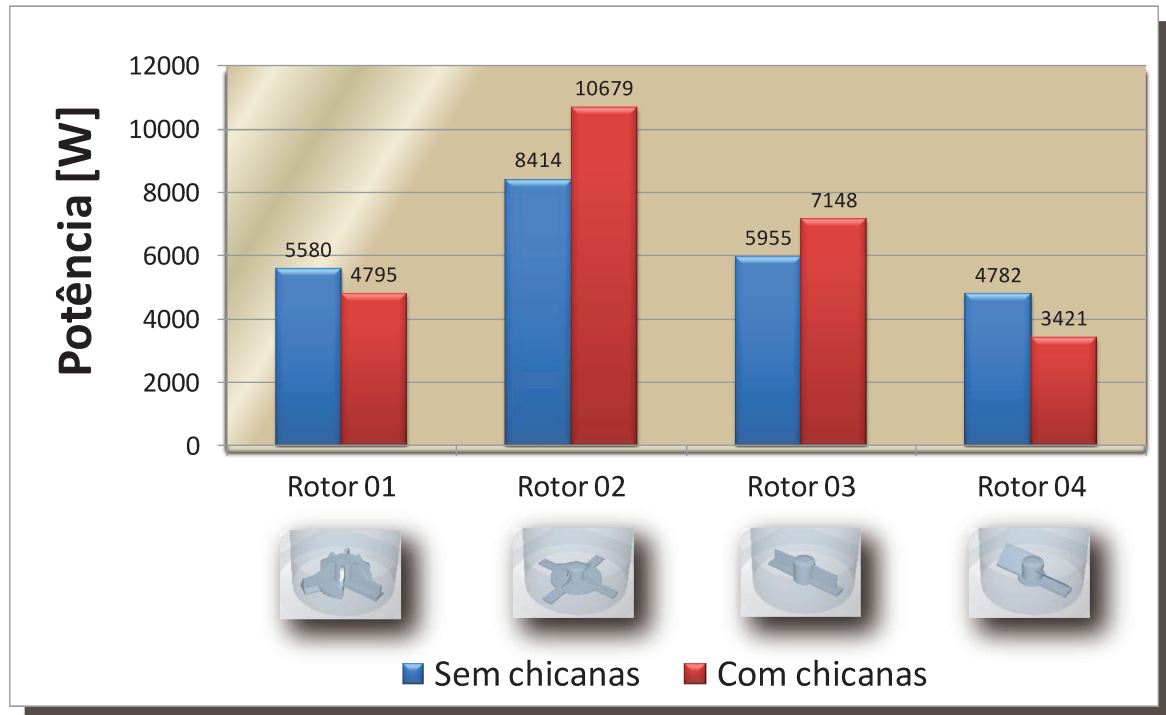


Figura 9.12 – Gráfico da potência dissipada por colisões para os diferentes rotores e geometrias

Para esta variável no Rotor 02 houve um aumento significativo da potência dissipada e Rotor 04 uma ligeira queda em ambas quando comparadas ao Rotor 01. Nota-se, contudo, que as diferenças entre o Rotor 01 e os Rotores 03 e 04 são pequenas, sendo respectivamente +7% e -14%.

Com respeito à adição de chicanas não encontrou-se um comportamento claro havendo diminuição nos valores das variáveis para os Rotores 01 e 04, e acréscimo para os Rotores 02 e 03. Embora com um comportamento similar ao obtido na geometria sem chicanas.

9.3.3 – Torque médio no rotor

Esta variável foi obtida através da média dos torques instantâneos registrados no rotor do equipamento. Os resultados são mostrados na Figura 9.13 .

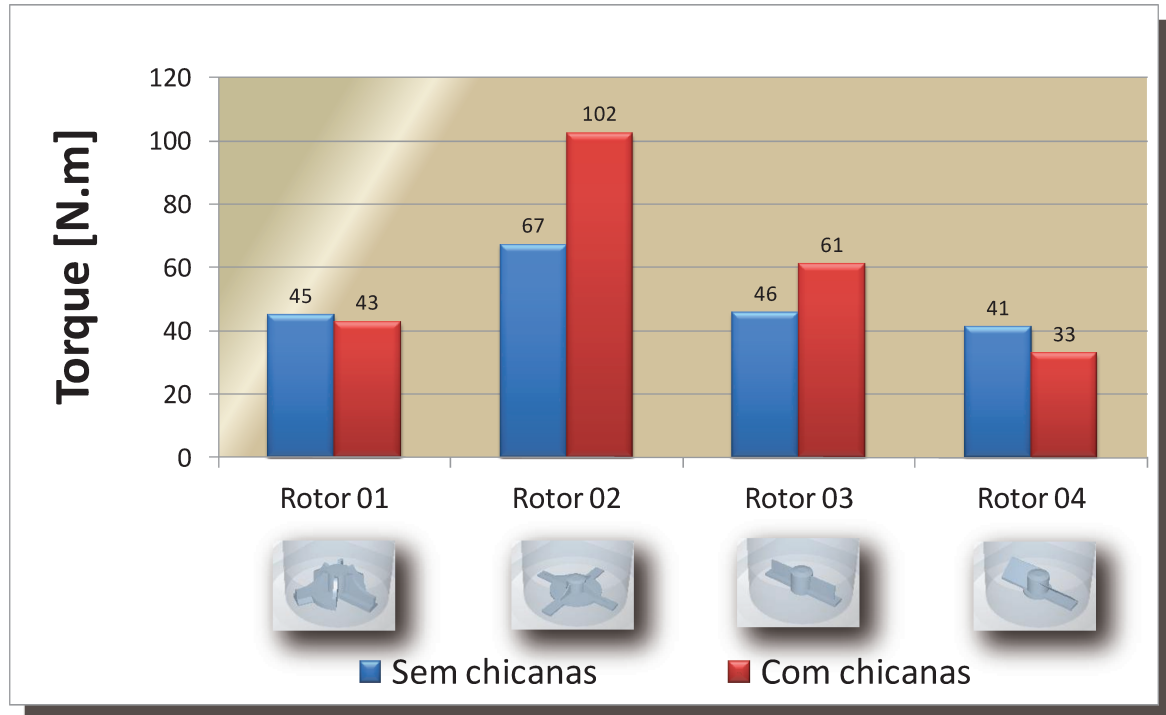


Figura 9.13 – Gráfico do torque médio para os diferentes rotores e geometrias.

Esta variável teve um comportamento idêntico à variável potência dissipada, apresentando seu maior valor para o Rotor 02, e variações menores para os outros quando comparados com o Rotor 01. Observou-se torques mais elevados para a geometria com chicanas nos Rotores 02 e 03, e quase sem variação nos Rotores 01 e 04, quando comparados com a geometria sem chicanas.

9.3.4 – Velocidade média das partículas

Este parâmetro foi tomado como sendo a velocidade média das partículas durante os 60 segundos de simulação executados. Os resultados estão na Figura 9.14.

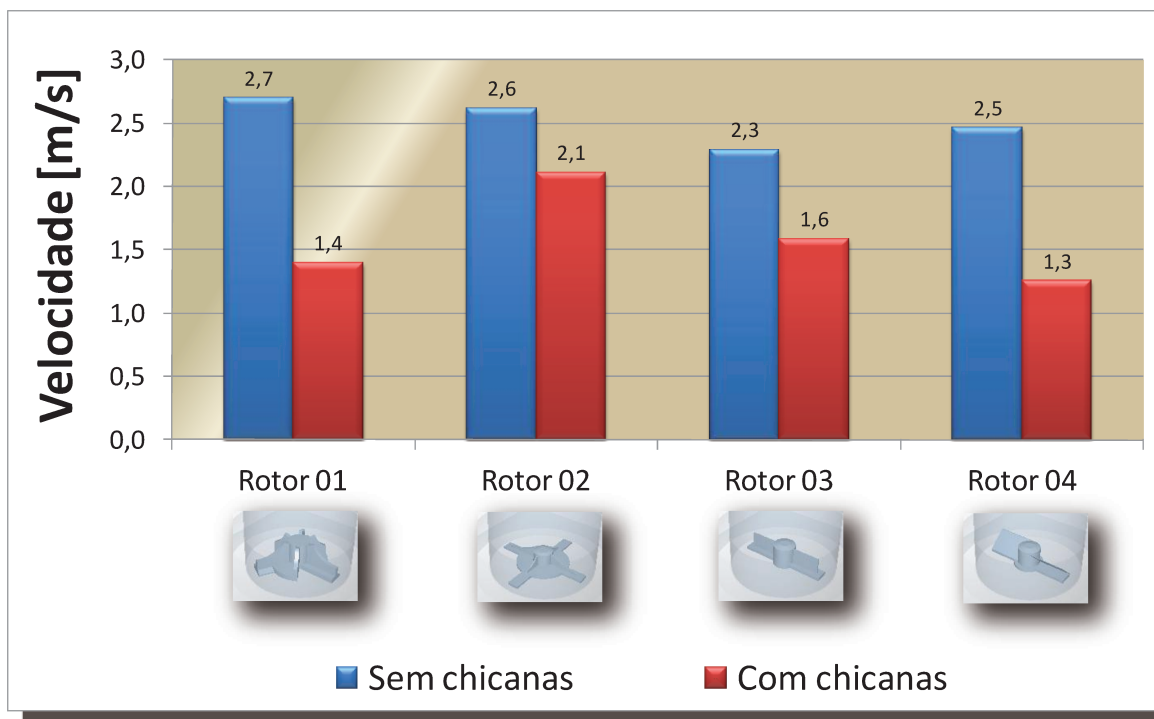


Figura 9.14 – Gráfico da velocidade médias das partículas para os diferentes rotores e geometrias.

Tem-se que a velocidade média das partículas no interior do equipamento, para a condição sem chicanas, não apresentou diferenças significativas entre os diversos tipos de rotores. Entretanto com a inclusão das chicanas, essa velocidade foi reduzida, principalmente no Rotor 04. De todos os rotores, o Rotor 02 foi o que teve a menor redução da velocidade com a inclusão das chicanas.

9.3.5 – Velocidade relativa média de colisão das partículas com a parte estática

Este parâmetro considera a velocidade relativa de colisão entre as partículas e o terço inferior da parte estática. No equipamento este terço inferior é a área por onde a água com as fibras deixa o equipamento. Não há qualquer equipamento adicional para auxiliar nessa retirada, sendo todo este processo conduzido pela ação do rotor do equipamento.

Para esta análise tomou-se então o parâmetro velocidade relativa para cada colisão entre uma partícula e o a região de interesse para parte estática durante a simulação. Tem-se nos resultados na Figura 9.15 .

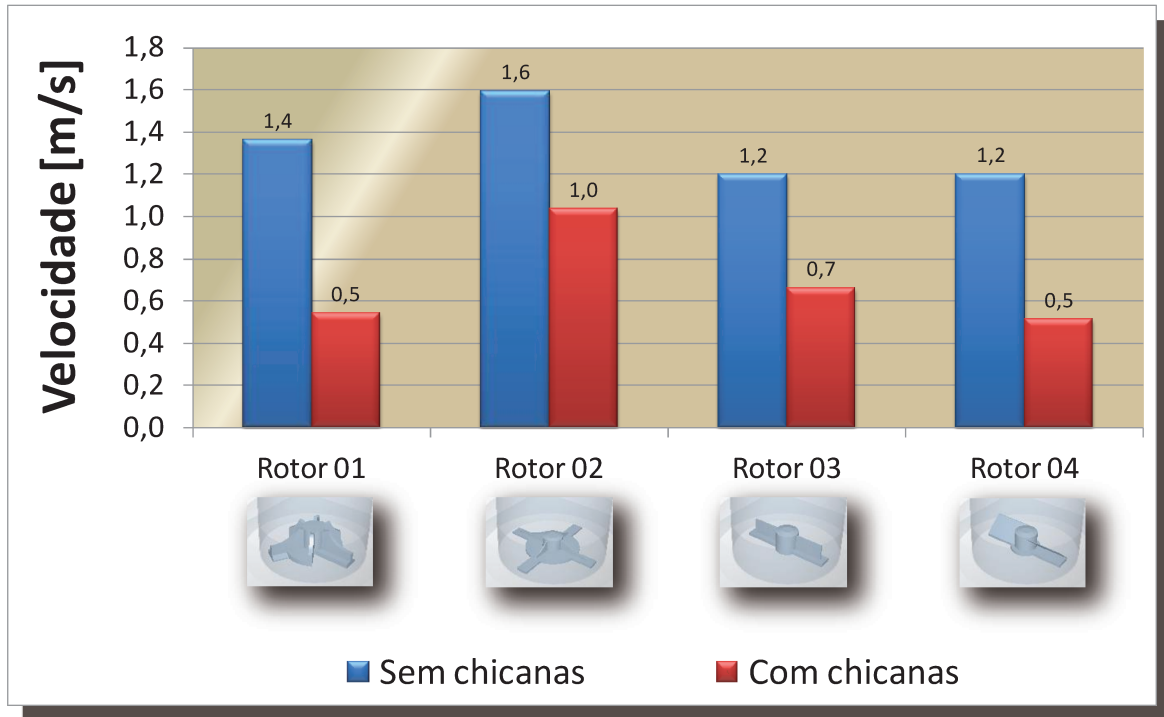


Figura 9.15 – Gráfico da velocidade relativa média de colisão entre partículas e a parte estática para os diferentes rotores e geometrias.

Para a velocidade relativa média de colisão tem-se o Rotor 02 sobressaltando-se com uma velocidade maior que os demais. A inclusão de chicanas também fez com que esta velocidade fosse diminuída em todos os rotores. As menores diminuições ocorreram nos Rotores 02 e 03, as maiores nos Rotores 01 e 04.

9.3.6 – Número de colisões: Total e por tipo.

Neste parâmetro analisamos o número total de colisões ocorridas durante os 60 segundos de simulação, e sua classificação por tipo. Os resultados estão apresentados nas Figuras 9.16 e 9.17, e nas Tabelas 9.01 e 9.02.

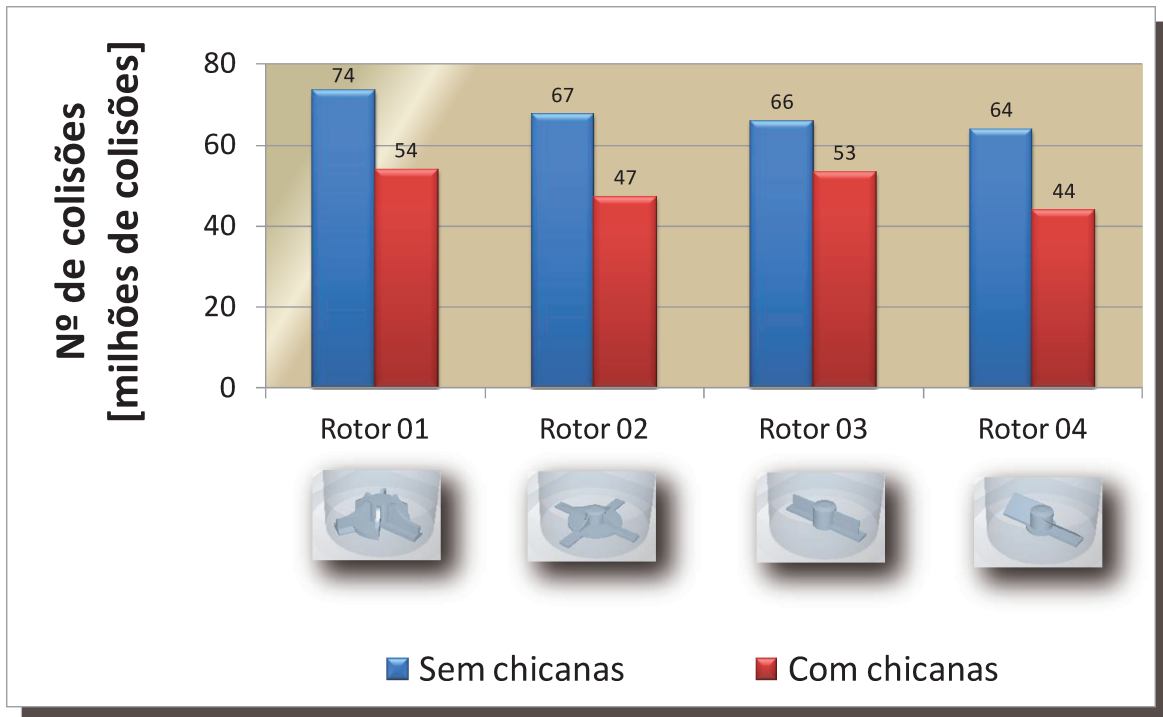


Figura 9.16 – Gráfico do número total de colisões para os diferentes rotores e geometrias.

Tabela 9.1 – Tabela da distribuição dos tipos de colisão para os diferentes rotores sem a presença de chicanas

Tipo de Colisão	Rotor 01	Rotor 02	Rotor 03	Rotor 04
<i>Partícula / Partícula</i>	47208246	43733140	43644498	41350642
<i>Partícula / Parte Estática</i>	26177781	23621295	22118478	22368971
<i>Partícula / Rotor</i>	147066	67489	131658	127823

Tabela 9.2– Tabela da distribuição dos tipos de colisão para os diferentes rotores sem a presença de chicanas

Tipo de Colisão	Rotor 01	Rotor 02	Rotor 03	Rotor 04
<i>Partícula / Partícula</i>	40302984	35151995	39298788	33101278
<i>Partícula / Parte Estática</i>	11530533	9955800	11997595	9206978
<i>Partícula / Rotor</i>	269405	235919	213291	175371
<i>Partícula / Chicana</i>	1778073	1840172	1812970	1359125

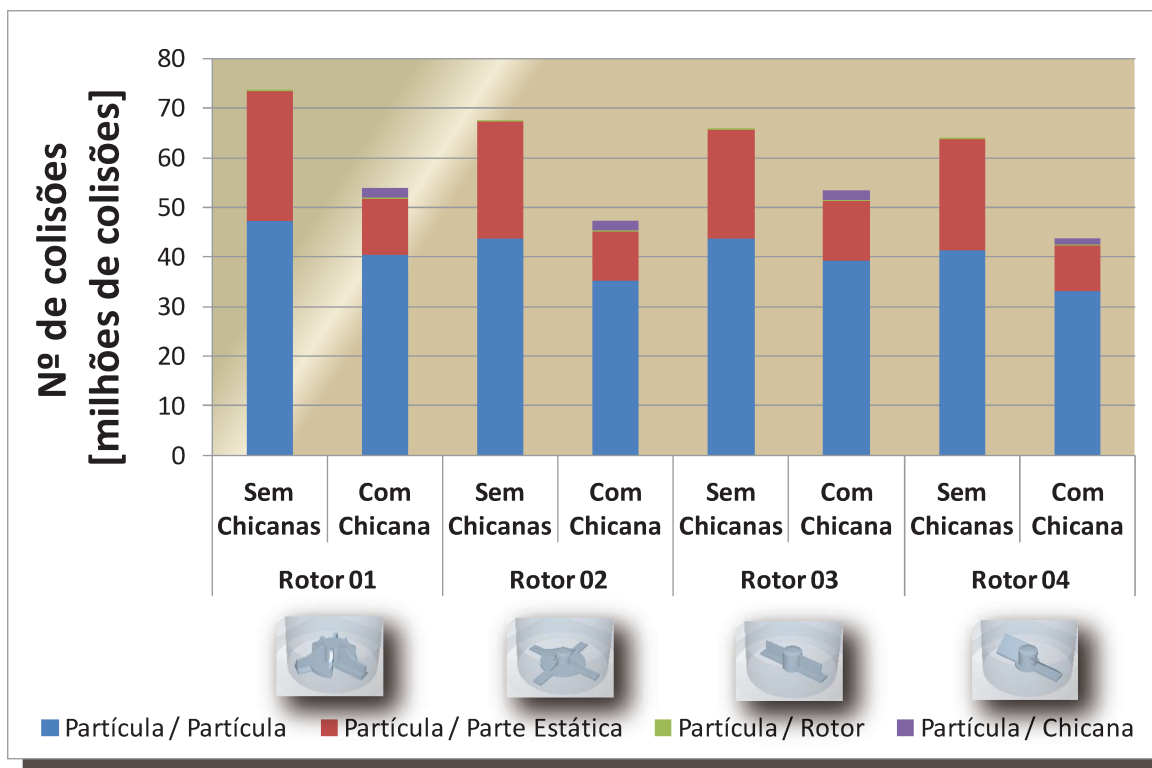


Figura 9.17 – Gráfico da distribuição dos tipos de colisões para cada um dos rotores e das geometrias durante o período da simulação.

Para o número total de colisões não tivemos grandes variações de um tipo de rotor para o outro. Nota-se que com a presença de chicanas, o número total de colisões diminuiu. Contudo, os valores nos mostram que com a adição de chicanas tem-se um aumento no percentual de colisões partícula – partícula, e partícula – rotor, não havendo diferenças entre os tipos de rotores. Em números totais o número de colisões partícula – rotor aumentou em todos os rotores, principalmente no Rotor 02.

9.3.7 – Distribuição da porcentagem de partículas por número de colisões

Este parâmetro é a distribuição da porcentagem de partículas pelo número máximo de colisões sofridas com o terço inferior da parte estática durante 10 segundos de simulação. Os resultados estão mostrados nas Figuras 9.18 a 9.21.

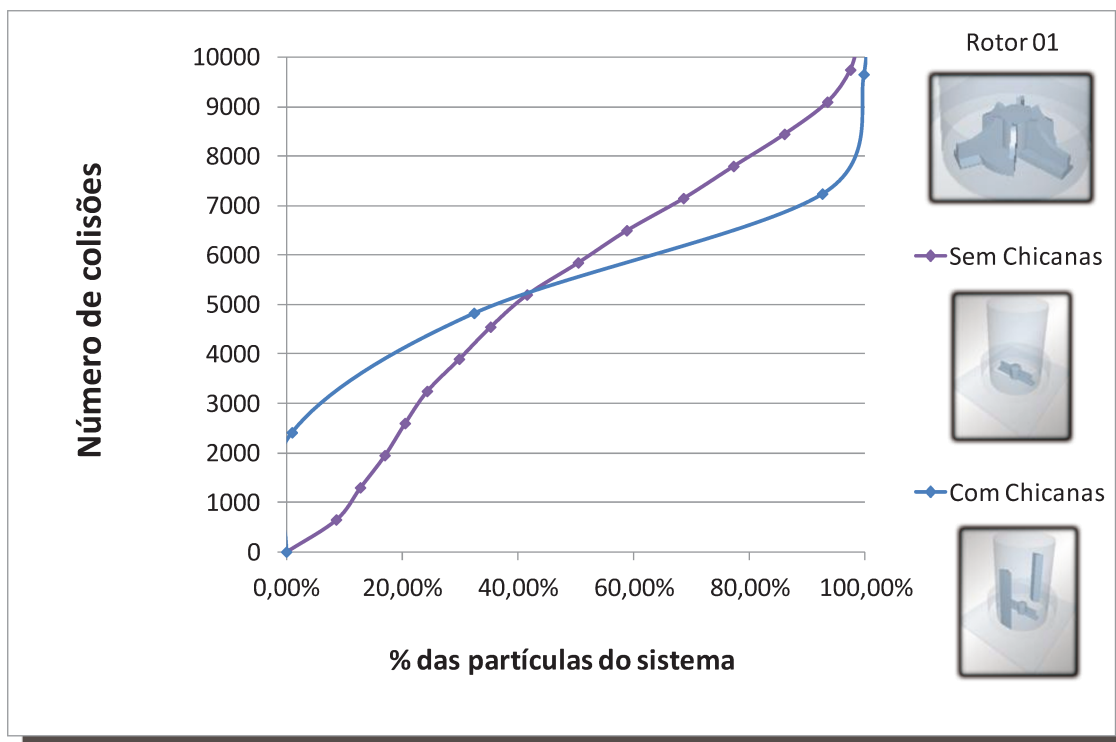


Figura 9.18 – Distribuição da porcentagem de partículas pelo número máximo de colisões com o terço inferior da parte estática durante 10 segundos para o Rotor 01.

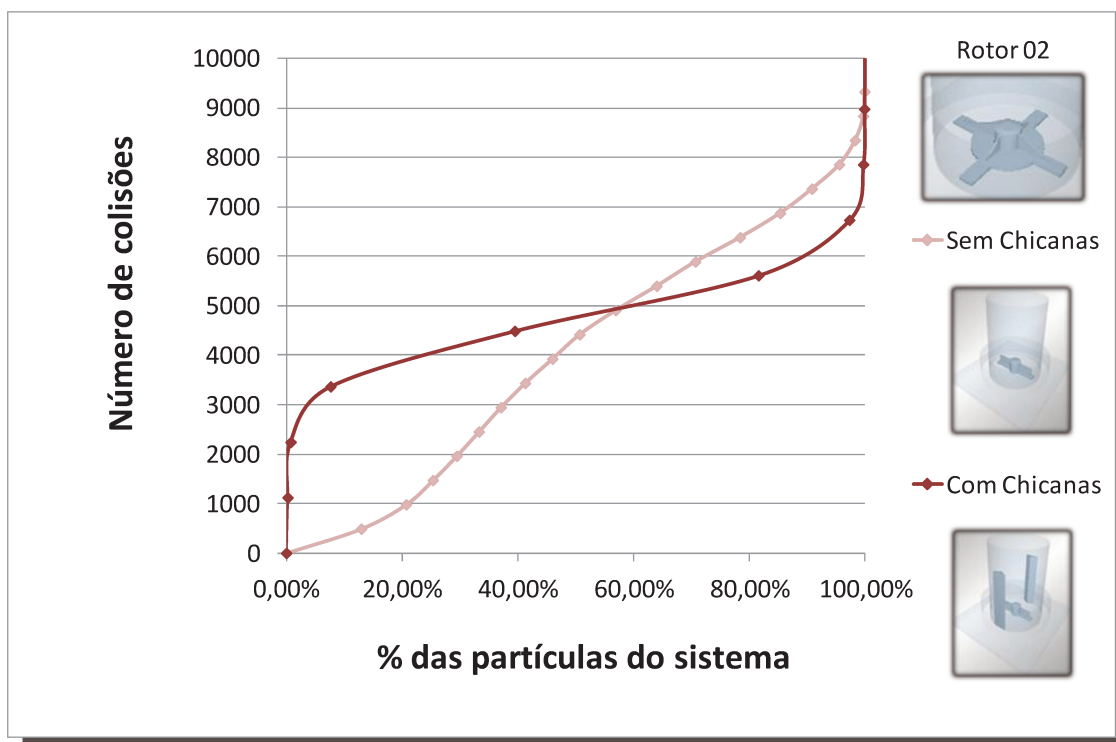


Figura 9.19 – Distribuição da porcentagem de partículas pelo número máximo de colisões com o terço inferior da parte estática durante 10 segundos para o Rotor 02.

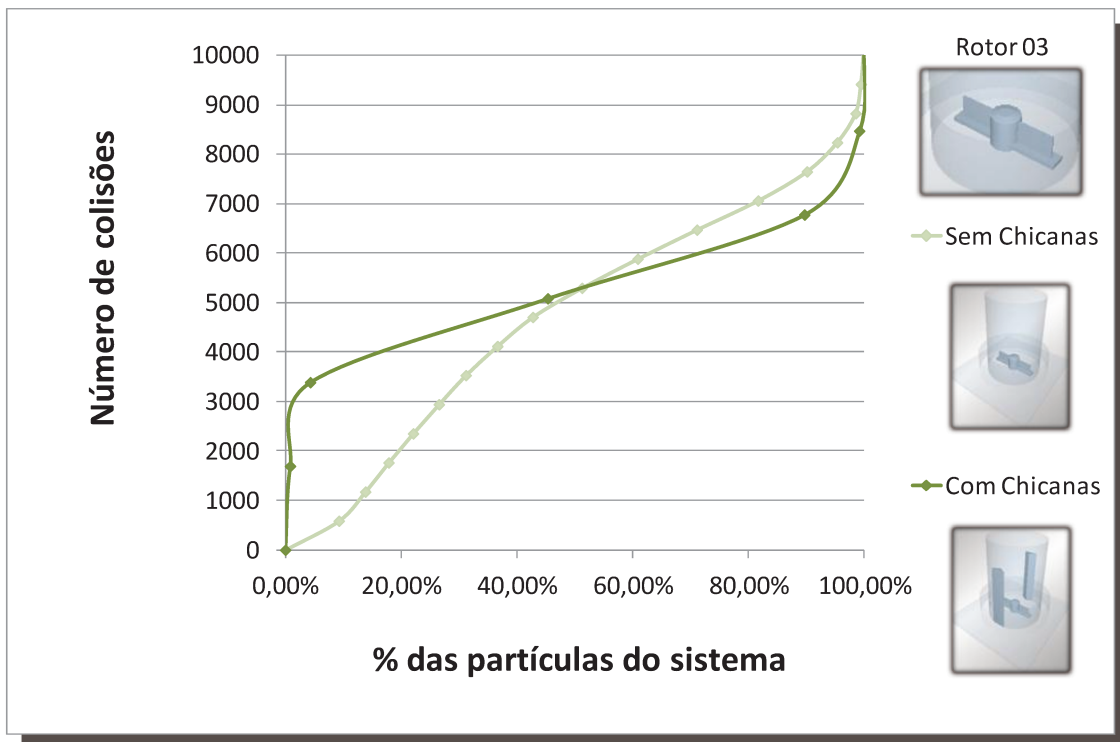


Figura 9.20 – Distribuição da porcentagem de partículas pelo número máximo de colisões com o terço inferior da parte estática durante 10 segundos para o Rotor 03.

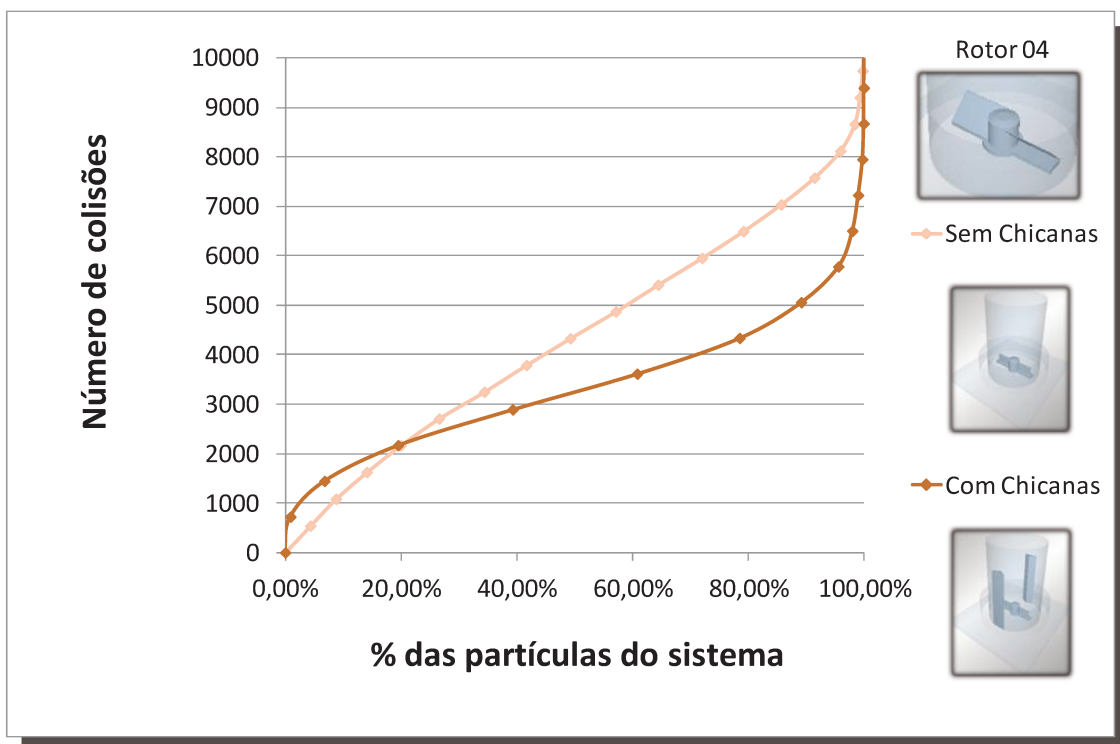


Figura 9.21 – Distribuição da porcentagem de partículas pelo número máximo de colisões com o terço inferior da parte estática durante 10 segundos para o Rotor 04.

A distribuição da porcentagem de partículas pelo número de colisões com o terço inferior da parte estática para as geometrias sem chicanas não apresentou significativas diferenças entre os diversos rotores. Contudo, é clara uma diferença entre as geometrias com e sem chicanas. Com adição das chicanas, observou-se um aumento significativo na homogeneidade da quantidade de colisões por partícula garantindo, assim, que o material, nessa geometria, apresente um maior número de partículas com colisões próximo ao valor médio do sistema, havendo apenas uma pequena quantidade de partículas com poucas colisões com a parte estática, e da mesma maneira apenas uma pequena quantidade de partículas com muitas colisões deste tipo.

9.3.8 – Energia dissipada por 1000 colisões

Este parâmetro apresenta a quantidade de energia dissipada por cada um dos sistemas para cada 1000 colisões ocorridas. Os resultados estão apresentados na Figura 9.22.

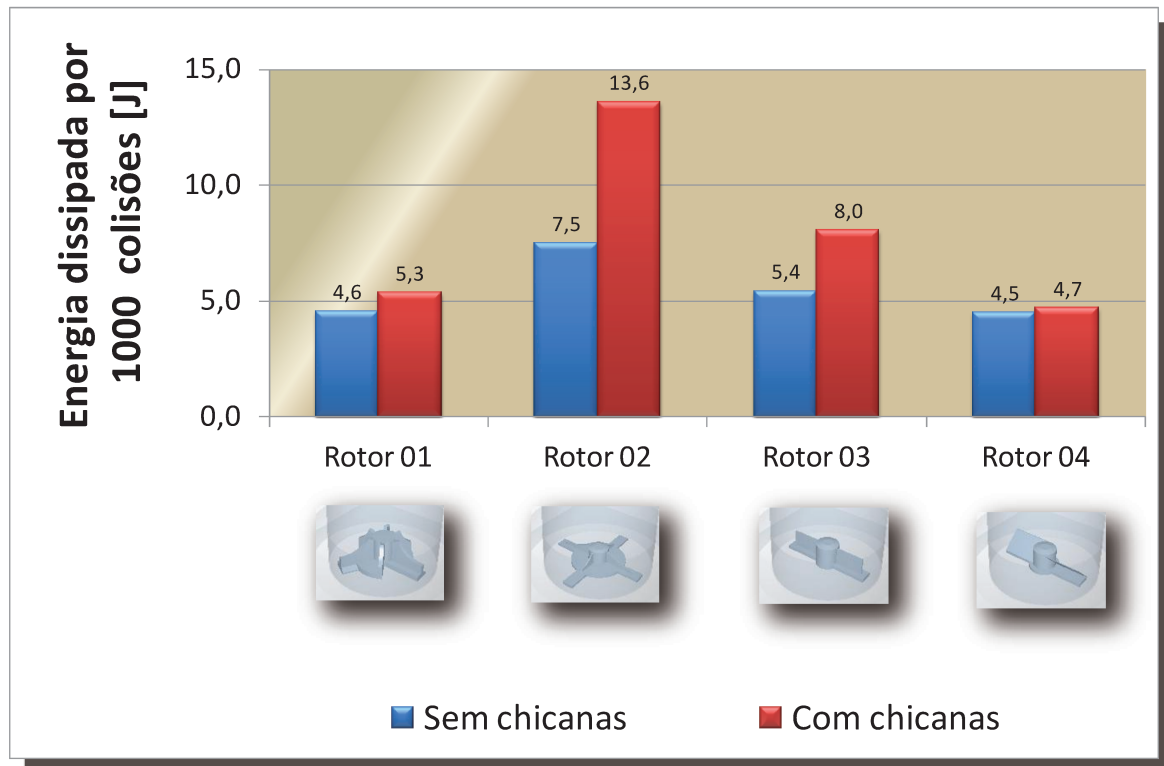


Figura 9.22 – Quantidade de energia dissipada pelos sistemas para cada 1000 colisões ocorridas.

Este parâmetro mensura qual a intensidade dos impactos em cada um dos sistemas estudados. Como resultado tem-se que o Rotor 02 apresenta impactos com maior energia dissipada quando comparados aos outros rotores nas duas geometrias estudadas para a parte estática. O Rotor 04 apresentou um comportamento muito parecido ao do Rotor 01, enquanto o Rotor 03 ficou em uma posição intermediária entre o comportamento do Rotor 02 e o comportamento do Rotor 01.

9.4 – Análises

Diante das aproximações feitas e de não se ter o conhecimento completo da dinâmica de funcionamento do equipamento real, não é possível afirmar qual dos parâmetros apresentados terá maior ou menor influência na qualidade e eficiência do processo de remoção do residual de fibras encontrado no composto de PE/Al, contudo algumas análises podem ser feitas com base nos resultados obtidos com as simulações, tendo sempre como referência o Rotor 01 na geometria sem chicanas, que é a simulação do equipamento real hoje em funcionamento.

Acerca da inclusão das chicanas, se por um lado estas contribuem para uma melhoria na distribuição das colisões das partículas (em virtude do aumento da componente radial da velocidade das partículas), o que poderia levar a uma maior mistura do material e propiciando melhor qualidade na remoção das fibras (retirada de fibra mais homogênea em toda a amostra do material) chegando até a uma redução do tempo de batelada. Por outro, diminuem a velocidade relativa média das colisões e a velocidade média das partículas no equipamento que pode fazer com que a remoção das fibras não seja tão eficiente e prejudicar a retirada delas do equipamento.

O Rotor 02, único entre os propostos com quatro aletas, foi o que obteve a maior velocidade média das partículas e a maior velocidade relativa média de colisão das partículas com a parte estática e maior energia dissipada por colisões, isto pode favorecer a remoção das fibras, e a sua retirada do equipamento. Contudo também obteve o maior torque e a maior potência dissipada o que pode levar a bateladas com menor quantidade. Esta é uma diferenciação interessante, pois em uma hipótese da força aplicada ao material

ser a principal influenciadora na eficiência e qualidade do processo de lavagem este rotor seria a melhor escolha.

Os Rotores 03 e 04 apresentaram desempenhos muito parecidos um com o outro. Ambos apresentam valores de velocidades relativas médias de colisão entre partículas e parte estática, velocidade médias das partículas, potência dissipada e torque muito próximos ao do Rotor 01, que é a referência de funcionamento do equipamento, com a vantagem de que seus desenhos são muito mais leves e de mais fácil construção que os outros rotores. Isto pode levar a um aumento na quantidade de material suportada pelo equipamento real em uma batelada, em virtude da diminuição da energia gasta pelo equipamento para a aceleração e movimentação destes rotores, o que levaria a um aumento em sua produtividade para uma mesma potência instalada. A única diferença entre os Rotores 03 e 04 foi na distribuição de colisões entre as partículas e o terço inferior da parte estática para a condição com chicanas, na qual o Rotor 03 apresentou um número maior de colisões o que em teoria ajudaria o equipamento provido com este rotor no melhor escoamento da água com fibras de celulose para fora do equipamento.

Tendo em vista os resultados apresentados e as diversas situações que cada simulação nos apresentou sugiro duas configurações para no futuro serem testadas e postas a prova para o entendimento de quais variáveis são realmente relevantes na eficiência do equipamento. Primeiro seria uma alteração no rotor, colocando-se em operação os Rotores 02 e 04. O Rotor 02 foi o que apresentou a maior diferença com relação ao Rotor 01 e o Rotor 04 foi o que apresentou a maior semelhança. Comparando o desempenho destes dois rotores com as simulações feitas poderíamos ponderar sobre quais parâmetros teriam mais influência na eficiência e produtividade do processo de lavagem. A segunda proposta seria a inclusão das chicanas de modo a avaliar o comportamento destes mesmos rotores com a sua inclusão e avaliar os resultados.

V – CONCLUSÃO

Neste trabalho simulou-se um modelo computacional utilizando o Método dos Elementos Discretos (DEM) aplicado a um equipamento lavador centrífugo utilizado na remoção do residual de fibras de celulose do composto de polietileno e alumínio proveniente do processo de reciclagem de embalagens cartonadas assépticas.

Para esta simulação foi usado o software comercial EDEM ® desenvolvido pela empresa *DEM Solutions*, implementando-se todas as geometrias e parâmetros físicos e operacionais do equipamento real.

Destaca-se neste trabalho, o uso do método dos elementos discretos na descrição de movimentos de um material flexível, e que nada tem de comum com partículas sólidas, rochas, ou esferas rígidas tradicionais em trabalhos com este método. Foi necessária a adaptação do modelo e a caracterização do material usando experimentos práticos e além de ajustar o modelo de modo que o conjunto de partículas ali presentes representassem de maneira satisfatória o material presente no equipamento real. Essa metodologia criada necessita ser testada como outros materiais similares em processos e situações onde o método dos elementos discretos possa ser aplicado e constitui-se na melhor contribuição deste trabalho.

Uma vez tendo o modelo ajustado foram propostas alterações no desenho construtivo do equipamento: três novos rotores e a inclusão de chicanas. Para as quais foram feitas simulações e analisados resultados.

Não se tem o funcionamento do equipamento totalmente compreendido. Seria necessário um estudo mais profundo e que contasse com comparações entre as simulações apresentadas e condições reais de funcionamento para determinar como cada variável interfere no processo. Contudo têm-se bons indícios de que algumas alterações podem ser sugeridas e testadas, baseadas nas comparações obtidas com as simulações executadas, e assim comprovar sua real eficiência. Foram sugeridas duas configurações que espero sejam alvo de trabalhos futuros de comparação e, assim, também se avance na melhor compreensão de quais são as variáveis que dirigem este processo.

O método dos elementos discretos demonstrou-se ser um método poderoso e cujas aplicações em diversos ramos industriais são inúmeras, contudo ainda pouco exploradas.

O software EDEM ® mostrou-se uma ferramenta versátil, de fácil utilização e muito útil para a realização deste tipo de simulação e uso no meio industrial. Tendo o método dos elementos discretos já implementado, basta ao usuário encontrar as propriedades adequadas o sistema e processo a ser estudado, o que pode ser feito via literatura ou via experimentos que podem ser facilmente replicados, e de maneira bastante acessível. Sua ferramenta de análise de resultados é bastante completa permitindo uma compreensão e análise bastante profunda do processo analisado.

VI – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRATIA, P.E., DUONG, N.H., MUZZIO, F.J., GODBOLE, P., REYNOLDS, S., **A study of the mixing and segregation mechanisms in the Bohle tote blender via DEM simulations.** Powder Technology 164, 50–57, 2006.

ASHBY, M. F., JONES, D. R. H., **Engineering Materials 1 - An Introduction to their Properties and Applications.**, Butterworth-Heinemann, 2a edição, UK, 1996.

ASTM INTERNACIONAL **D 1894-08: Standart test method for static and kinetic coefficients of friction of plastic film and sheeting.** Philadelphia, 2008a.

ASTM INTERNACIONAL **D 792-08: Standart test method for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement.** Philadelphia, 2008b.

ATERRO CONTROLADO. Disponível em <http://diariodovale.uol.com.br/noticias/4,17293.html#axzz1aDqpSAH7> . Acesso: 08 de Outubro de 2011.

ATERRO SANITÁRIO 01. Disponível em <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/imagens/residuos/aterro.gif> . Acesso: 04 de Janeiro de 2010.

BALEVICIUS, R., KACIANAUSKAS, R., MROZ, Z., SIELAMOWICZ, I., **Discrete element method applied to multiobjective optimization of discharge flow parameters in hoppers.** Structural and Multidisciplinary Optimization 31, 163–175, 2006.

BERTRAND, F., LECLAIRE, L.A., LEVECQUE, G., **DEM-based models for the mixing of granular materials.** Chemical Engineering Science 60, 2517–2531, 2005.

BOX, G. E. P. e DRAPER, N. R. **Evolutionary operation: a statistical method for process improvement.** Wiley, Nova York, 1969.

BRASIL. Portaria ANVISA nº 177 de 04 de março de 1999. **Disposições gerais para embalagens e equipamentos celulósicos em contato com alimentos.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 08 de março de 1999.

BRASIL. Resolução ANVISA RDC N.º 129, de 10 de maio de 2002. **Regulamento Técnico sobre Material Celulósico Reciclado.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 13 de maio de 2002.

CALLISTER, W. D., **Fundamentals of Materials Science and Engineering,** John Wiley & Sons, Inc, New York, 2001.

CEMPRE, **Fichas Técnicas: Embalagem longa vida.** Disponível em http://www.cempre.org.br/ft_longavida.php . Acesso 20 de Dezembro de 2011.

CERQUEIRA, M.H. **Placas y tejas producidas del reciclado del polietileno/aluminio presentes en los embalajes Tetra Pak.** Magazine Tecnología y Construcción, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Central de Venezuela, Venezuela, 2004.

CETEA/ITAL, **Relatório A 075-1/09 – Caracterização de estruturas para reciclagem,** Centro de tecnologia em Embalagem – CETEA/ITAL, Campinas, São Paulo, 2009.

CHUNG, Y. C. E OOI, J. Y., **Influence of Discrete Element Model Parameters on Bulk Behavior of a Granular Solid under Confined Compression,** Particulate Science and Technology: An International Journal, 26:1, 83-96, 2007.

CLEARY, P.W. **DEM prediction of industrial and geophysical particle flows.** Particuology, 8, 106–118, 2010.

CORTE TRANSVERSAL EMBALAGEM, Disponível em <http://campaign.tetrapak.com/lifeofapackage/br/what-its-made-of/> .Acesso: 08 de Outubro de 2011.

CUNDALL, P.A., STRACK, O.D.L., **A discrete numerical model for granular assemblies.** Geotechnique 29, 47–65, 1979.

DEM SOLUTIONS, **EDEM 1.3 User Guide,** Revision 07, DEM Solutions, Edinburgh, UK, 2007a.

DEM Solutions, **Materials Database Values,** Help EDEM, DEM Solutions, Edinburgh, UK, 2007b.

DI RENZO, A., DI MAIO, F.P., **Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes.** Chemical Engineering Science 59, 525–541, 2004.

FAVIER, J. **Industrial application of DEM: Opportunities and Challenges.** DEM Solutions Ltd, Edinburgh, UK, 2007.

GRIMA, A. P., WYPYCH, P. W. **Investigation into calibration of discrete element model parameters for scale-up and validation of particle–structure interactions under impact conditions.** Powder Technology, 212, 198 – 209, 2011.

HARPER, T.R., LAST, N., **Interpretation by numerical modeling of changes of fracture system hydraulic conductivity induced by fluid injection.** Geotechnique, 39:1, 1989.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFICA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**, Rio de Janeiro, 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado**. São Paulo: IPT/CEMPRE, 1995.

JOAQUIM JUNIOR, C. F., CEKINSKI, E., NUNHEZ, J. R., URENHA, L. C., **Agitação e mistura na indústria**, p 122, LTC, Rio de Janeiro, 2007

KAFRITSAS, J., EINSTEIN, H., **Coupled flow-deformation analysis of a dam foundation with the distinct element method**. 28th US Symposium of Rock Mechanics, pp 484-490, Tucson, 1987.

KAO-WALTER, S., DALSTRÖM, J., KARLSSON, T. AND MAGNUSSON, A., **A study of the relation between the mechanical properties and the adhesion level in a laminated packaging material**. Mech. of Comp. Mat., 40(1), 2004.

KRUGGEL-EMDEN, H., WIRTZ, S., SIMSEK, E., SCHERER, V., **Modeling of granular flow and combined heat transfer in hoppers by the discrete element method**. Journal of Pressure Vessel Technology—Transactions of the ASME 128, 439–444, 2006.

KRUGGEL-EMDEN, H., SIMSEK, E., WIRTZ, S., SCHERER, V., **A Comparative Numerical Study of Particle Mixing on Different Grate Designs through the Discrete Element Method**. Journal of Pressure Vessel Technology 129 (4), 2007.

KWAPINSKA, M., SAAGE, G., TSOTSAS, E., **Mixing of particles in rotary drums, A comparison of discrete element simulations with experimental results and penetration models for thermal processes**. Powder Technology 161, 69–78, 2006.

LANGSTON, P.A., TUZUN, U., HEYES, D.M., **Continuous potential discrete particle simulations of stress and velocity-fields in hoppers—transition from fluid to granular flow**. Chemical Engineering Science 49, 1259–1275. 1994.

LEMOS, J., **A distinct elemnt model for dynamic analysis of jointed rock with application to dam foundations and fault motion**. PhD thesis, University of Minnesota, 1987.

LIMTRAKUL, S., BOONSRIRAT, A., VATANATHAM, T., **DEM modeling and simulation of a catalytic gas–solid fluidized bed reactor, a spouted bed as a case study**. Chemical Engineering Science 59, 5225–5231, 2004.

LIXAO 01. Disponível em

http://condef.files.wordpress.com/2008/12/lixao_estrutural1.jpg. Acesso: 04 de Janeiro de 2010.

LIXAO 02. Disponível em <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/imagens/residuos/lixao.gif>. Acesso: 04 de Janeiro de 2010.

LORIG, L. J., BRADY, B. H. G., **A hybrid computational scheme for excavation in support design for jointed rock media**. Design and Performance of Underground Excavation Conference, pp105-112, Cambridge, England, 1984

MALONE, K. F., XU, B. H., **Particle-scale simulation of heat transfer in liquid fluidised beds**. Powder Technology, 184(2), 189–204, 2008.

MENEZES, R. A.; GERLACH, J. L.; MENEZES, M. A., **Estágio atual da incineração no Brasil**. In: VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, Anais. Curitiba, PR, 2000.

MERENDINO, E.; NEVES, F.L. **Curbside collection: São Paulo case study for collection and recycling of used milk and beverages carton packages**. In: IV Global Conference on Sustainable Product Development and Life Cycle Engineering, 2006, São Carlos. Conference Proceedings. São Carlos: USP, 2006

MERENDINO, E. M.; NEVES, F.L. **Comparação das propriedades mecânicas do papel obtido a partir da reciclagem de embalagens longa vida pós-consumo e de aparas de papelão ondulado**. In: 40° Congresso Internacional de Celulose e Papel – ABTCP, Outubro, 2007, São Paulo. Anais. São Paulo, 2007.

MINDLIN, R. D., **Compliance of elastic bodies in contact**, Journal of Applied Mechanics, 16, 259-26, 1949.

MINDLIN, R.D., DERESIEWICZ, H., **Elastic spheres in contact under varying oblique forces**. Journal of Applied Mechanics 20, pp. 327– 344, 1953.

MNCR. MNCR é contra a incineração na Política de Resíduos, **De catador para catador**. Edição Cidade de São Paulo, Ano III - número 3, p 04, São Paulo, Agosto de 2010.

MOURAD, A. L.; GARCIA, E. E. C.; VILELA, G. B.; VON ZUBEN, F., **Evaluation of Environmental Aspects from Recycling Rate Increase of Cardboard of Aseptic Packaging System for Milk**. In: IV Global Conference on Sustainable Product Development and Life Cycle Engineering, 2006, São Carlos. Conference Proceedings. São Carlos: USP, 2006.

NEVES, F.L., **Reciclagem de embalagens cartonadas Tetra Pak**. O Papel, n. 2, 1999.

NEVES, F.L., **Novos desenvolvimentos para reciclagem de embalagens longa vida**. In: 37° Congresso Internacional de Celulose e Papel – ABTCP, Outubro, 2004, São Paulo. Anais. São Paulo, 2004.

NG, T-T., **Input parameters of discrete element methods.** Journal of Engineering. Mechanics 132, 723-729, ASCE, 2006.

OWEN, P.J., CLEARY, P.W. **Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM).** Powder Technology, 193, 274 – 288, 2009.

PANDEY, P., SONG, Y.X., KAYIHAN, F., TURTON, R., **Simulation of particle movement in a pan coating device using discrete element modeling and its comparison with video-imaging experiments.** Powder Technology 161, 79–88, 2006.

POURNIN, L., LIEBLING, T., **A generalization of distinct element method to tridimensional particles with complex shapes.** Powders & Grains, pp. 1375–1478. Leiden, Balkema, 2005.

SEIDEL, J. M. **Análise da Viabilidade Econômica e Ambiental das várias formas de reciclagem da embalagem cartonadas revestidas com plástico e alumínio.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo, 2004.

SILVA, J.B. **A indústria do alumínio e a crise de energia.** Revista Escola de Minas, v.54, n.2, Ouro Preto, abr./jun. 2001.

TATEMOTO, Y., MAWATARI, Y., NODA, K., **Numerical simulation of cohesive particle motion in vibrated fluidized bed.** Chemical Engineering Science **60**: 5010–5021, 2005.

TETRA PAK. **Relatório Socioambiental 2004-2005.** São Paulo, 2006.

TETRA PAK. **Relatório Socioambiental 2008-2009.** São Paulo, 2010.

THORNTON, C., YIN, K.K., **Impact of elastic spheres with and without adhesion.** Powder Technology 65, 153–166, 1991.

TING, J. M., CORKUM, B.T., **Applications of discrete element numerical modeling in geotechnical engineering,** 3rd International Conference on Computing in Civil Engineering, Vancouver, Canada, 1988

VARGAS JR., E. DO A., **Development and application of numerical methods to simulate the behavior of fractured rock masses,** Ph.D. Thesis, Imperial College, London, 1982.

VAN PUYVELDE, D.R., **Comparison of discrete elemental modelling to experimental data regarding mixing of solids in the transverse direction of a rotating kiln.** Chemical Engineering Science 61, 4462–4465, 2006.

VELLOSO, R. Q.; VARGAS JR., E. A.; CAMPOS, J. L. E.; GONÇALVES C. A **Numerical Implementation to Simulate Fluid-Mechanical Processes in Sand Production Using Discrete Elements.** Dept. of Civil Engineering, Catholic University, Rio de Janeiro, RJ, 2003.

VON ZUBEN, F.; NEVES, F.L. **Reciclagem do alumínio e do polietileno presentes nas embalagens cartonadas Tetra Pak.** In: Seminário Internacional de Reciclagem do Alumínio, São Paulo, 1999. Anais. São Paulo: ABAL, 1999

VON ZUBEN, F. **Recycling Implementation of Liquid Food Cartons in Europe and Brazilian Model in Collection and Recycling.** In Municipal Solid Waste Conference, 2002, Istanbul. Conference Proceedings, Istanbul, Turkey, 2002.

VON ZUBEN, F. **Recycling Polyethylene and Aluminium from Aseptic Packaging via Plasma Process.** In: IV Global Conference on Sustainable Product Development and Life Cycle Engineering, 2006, São Carlos. Conference Proceedings. São Carlos: USP, 2006.

VU-QUOC, L., ZHANG, X., **An accurate and efficient tangential force–displacement model for elastic frictional contact in particle-flow simulations.** Mechanics of Materials 31, 235–269, 1999a.

VU-QUOC, L., ZHANG, X., **An elastoplastic contact force–displacement model in the normal direction, displacement-driven version.** Proceedings of the Royal Society of London Series A—Mathematical Physical and Engineering Sciences 455, 4013–4044, 1999b.

WALTON, O.R., BRAUN, R.L., **Viscosity, granular-temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks.** Journal of Rheology 30, 949–980, 1986a.

WALTON, O.R., **Numerical simulation of inclined chute flows of monodisperse inelastic, frictional spheres.** Mechanics of Materials 16, 239–247, 1993.

YANG, R.Y., ZOU, R.P., YU, A.B., **Microdynamic analysis of particle flow in a horizontal rotating drum.** Powder Technology 130, 138–146, 2003.

ZHONG, W.Q., XIONG, Y.Q., YUAN, Z.L., ZHANG, M.Y., **DEM simulation of gas–solid flow behaviors in spout-fluid bed.** Chemical Engineering Science 61, 1571–1584, 2006.

ZHU, H.P., ZHOU, Z.Y., YANG, R.Y., YU, A.B., **Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments.** Chemical Engineering Science 62, 3378–3396, 2007.