

DEGRADAÇÃO MECÂNICA DE PELotas DE MINÉRIO DE FERRO DURANTE O MANUSEIO E TRANSPORTE. PARTE 2: ESTUDOS DE CASOS DE SIMULAÇÃO*

Luís Marcelo Marques Tavares¹
Rodrigo Magalhães de Carvalho²
Hélio Cardoso Pereira³
Maciel Rodrigues Bianchi⁴
Maurício Marcos Otaviano⁵

Resumo

Conforme apresentado na parte 1 do artigo, uma metodologia inédita de previsão de resultados de degradação mecânica de pelotas, desde a usina pelletizadora até o pátio ou forno do cliente, foi proposta, resultando no desenvolvimento de um simulador do processo, o qual permite inserir as características das pelotas produzidas, bem como o fluxograma de manuseio. A fim de demonstrar a utilidade já encontrada pela Samarco na aplicação do simulador, três estudos de casos foram apresentados: no estabelecimento, junto a um cliente, da faixa de tamanhos ótima das pelotas a serem fornecidas, que permitiu o aumento da sua resistência à degradação, minimizando os custos de produção; no auxílio à tomada de decisão em um projeto de expansão na instalação portuária em Ponta Ubú. O último estudo de caso tratou do apoio aos esforços de um cliente situado no Oriente Médio na identificação e tomada de decisão sobre ações que poderiam minimizar a degradação dentro de suas instalações.

Palavras-chave: Pelotas; Minério de ferro; Degradação; Simulação; Manuseio.

MECHANICAL DEGRADATION OF IRON ORE PELLETS DURING HANDLING. PART 2: SIMULATION CASE STUDIES

Abstract

Part 1 of this paper presented a novel methodology to predict degradation of pellets from the pelletizing plant to either the client's stockyard or furnace. A process simulator was developed, which allows inserting the characteristics of the pellets produced, as well as the handling flowsheet, allowing to predict the intensity of degradation. In order to demonstrate the usefulness of the simulator for Samarco Mineração, three case studies are presented: in the establishment, with the client, of the optimal size range of pellets to be provided, which allowed the increase in the resistance to degradation during handling and reduction of production costs; in the assistance in the decision-making process in the expansion project of the port facility at Ponta Ubú. The last case study dealt with the efforts of a cliente situated in the Middle East in the identification and decision making regarding actions that could be used to minimize mechanical degradation inside its installations.

Keywords: Pellets; Iron ore; Degradation; Simulation; Handling.

- ¹ Engenheiro de Minas, M.Sc., Ph.D, Professor Titular, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- ² Engenheiro Químico, M.Sc., D.Sc., Professor Adjunto, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- ³ Engenheiro Metalúrgico, M.Sc., Especialista de Produto Sênior, Gerencia Geral de Marketing; Samarco Mineração S/A, ES, Brasil.
- ⁴ Engenheiro Metalúrgico, Analista de Produtos, Gerencia de Relacionamento com o Mercado, Samarco Mineração S/A, ES, Brasil.
- ⁵ Engenheiro Metalúrgico, D.Sc., Especialista de Produtos Senior, Gerencia Geral de Marketing; Samarco Mineração S/A, ES, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Na primeira parte desse artigo [1] foi descrito uma nova metodologia de previsão de resultados de degradação de pelotas de minério de ferro durante o manuseio e transporte.

Essa metodologia e o simulador desenvolvido podem ser usados em diversas importantes aplicações, como por exemplo:

- Adequar as características da pelota produzida ao sistema de manuseio do cliente, aumentando a resistência à degradação quando o seu sistema de manuseio for mais severo, e aumentando a tolerância da resistência da pelota (e, potencialmente, aumentando a produtividade da usina) quando o sistema de manuseio até o forno do cliente for mais brando.
- Estabelecer sistemas mais adequados de controle do processo produtivo por meio do entendimento da influência das variáveis de processo na resposta de pelotas à degradação.
- Estabelecer programas mais adequados de manutenção de equipamentos, em particular fornos de endurecimento de pelotas, com vistas a permitir a tomada da decisão sobre o momento mais adequado para sua realização ou até mesmo para embasar uma difícil decisão sobre o momento da sua desativação. Um exemplo disso é o caso de grelhas de fornos horizontais de endurecimento, os quais são muito usados em usinas pelletadoras: o momento da sua substituição pode ser decidido caso seja possível quantificar adequadamente o seu efeito na variabilidade da resistência mecânica de pelotas queimadas.
- Auxiliar na tomada de decisão sobre modificações em sistemas de manuseio e estocagem, tanto no interior da própria usina pelletadora, quanto até o pátio ou forno do cliente. Isso tornaria possível quantificar ganhos a serem obtidos na redução da proporção de finos gerados e fragmentos resultantes da adoção de alterações em partes dos sistemas de manuseio.

O presente trabalho apresenta três estudos de caso de aplicação da metodologia desenvolvida e do simulador, que demonstram o benefício já encontrado pela Samarco e pelos seus clientes na sua aplicação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras de pelotas produzidas pela Samarco Mineração foram coletadas para ensaios. As amostras foram, inicialmente, fracionadas por tamanhos, sendo medidas as suas distribuições granulométricas, caracterizando a proporção de pelotas bem formadas e cacos por faixa de tamanhos. Cada amostra, contida em faixas estreitas de tamanhos, foi submetida aos ensaios listados na Tabela 1, permitindo determinar a distribuição de energias de fratura por impacto, bem como a resposta das pelotas à fragmentação superficial e volumétrica, em função da energia aplicada no impacto e do tamanho de partícula. Com isso, os sub-modelos que compõem o modelo de degradação puderam ser ajustados.

Tabela 1. Parâmetros e ensaios necessários para a calibração do modelo

Ensaio	Equipamento	Objetivo
Energia de fratura	Célula de Carga de Impacto	Determinar a distribuição de energias de fratura
Impactos repetidos	<i>Drop weight tester</i>	Determinar a resposta à fragmentação por impactos repetidos
Fragmentação volumétrica	<i>Drop weight tester</i>	Determinar a distribuição de tamanhos em função da energia aplicada
Fragmentação superficial	Fratura autógena	Determinar a proporção de finos gerada em cada impacto de baixa magnitude

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de demonstrar a utilidade já encontrada pela empresa na aplicação da modelagem, bem como do simulador de degradação, três estudos de casos foram realizados. Inicialmente é apresentado um caso no qual o uso das metodologias de caracterização do presente trabalho permitiu embasar a recomendação da empresa produtora de reduzir o tamanho médio das pelotas fornecidas ao cliente, resultando em benefícios para ambos. O segundo estudo de caso tratou do uso da simulação na comparação de alternativas para a expansão de capacidade da unidade portuária da empresa, comparando-se o repotenciamento do shiploader ou do uso de silos de estocagem. O terceiro estudo de caso tratou do apoio a um cliente, situado no Oriente Médio, na realização de modificações no seu sistema de manuseio a fim de minimizar a degradação de pelotas.

3.1. Estudo de Caso 1

O primeiro estudo de caso tratou da definição, junto a um cliente em particular, da faixa ótima de tamanho de pelotas que deveria ser fornecida. Esse cliente se caracteriza por realizar operações de manuseio bastante severas e não dispõe de unidade de sinterização, de maneira que a minimização da geração de finos durante o manuseio era prioritária. Isso, aliado ao fato que o cliente demanda pelotas com elevada redutibilidade durante a sua redução no reator de redução direta, restringiu as ações que poderiam ser tomadas no que diz respeito a mudanças nas características das pelotas, em particular limitando a seleção de composições mineralógicas do pellet feed ou o uso de aditivos mais adequados para conferir alta resistência às pelotas, tendo em vista a demanda por alta redutibilidade.

O ponto de partida para esse trabalho é apresentado na Figura 14, que mostra que o valor mediano das energias de fratura por impacto de pelotas diminui significativamente com o aumento do tamanho de partícula. Ele mostra que a produção de pelotas de maior diâmetro resulta em maior risco de degradação por impacto, devido à sua superior fragilidade. A figura também mostra que cacos têm resistências mais baixas que pelotas, de forma que fragmentos produzidos durante o manuseio tentem a se fragmentar mais prontamente em um impacto futuro que pelotas bem formadas.

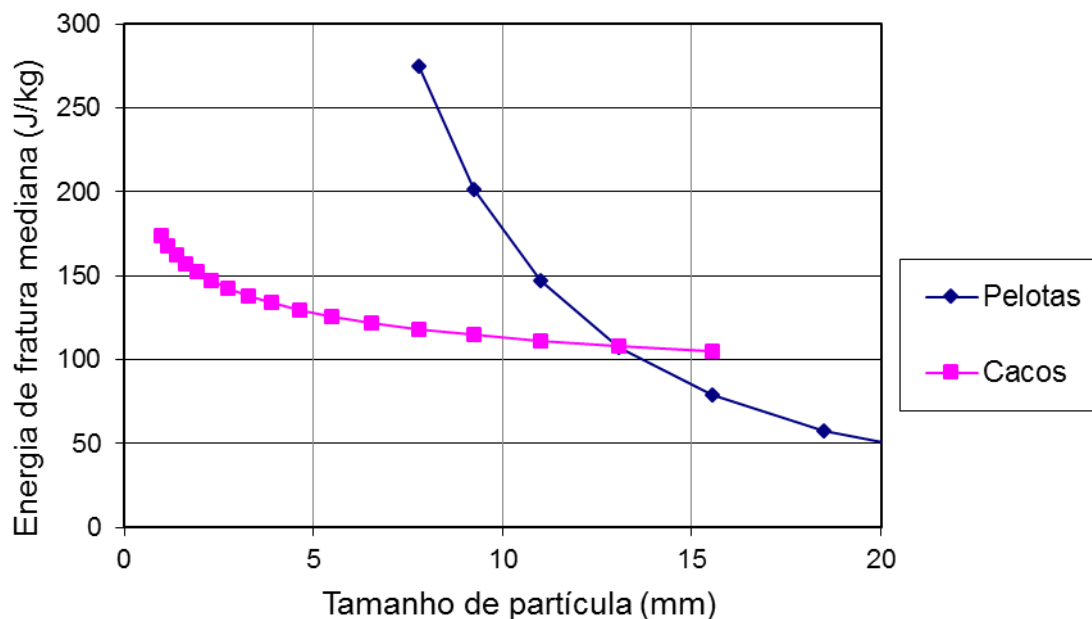


Figura 1. Variação da energia mediana de fratura por impacto de pelotas de minério de ferro

Adicionalmente à menor resistência à fratura em um único impacto, também se tornou evidente que pelotas de maiores diâmetros também são mais suscetíveis à fratura por impactos repetitivos.

A fim de verificar esta hipótese, foi utilizado o simulador considerando como premissa uma mesma qualidade física da pelota e um mesmo fluxo de manuseio, entretanto, com relação granulométrica de 0,7 e 1,1. As Figuras 2 e 3 mostram que o material com relação granulométrica de 1,1 obteve uma degradação 3% maior, quando comparado àquele com relação granulométrica igual a 0,7.

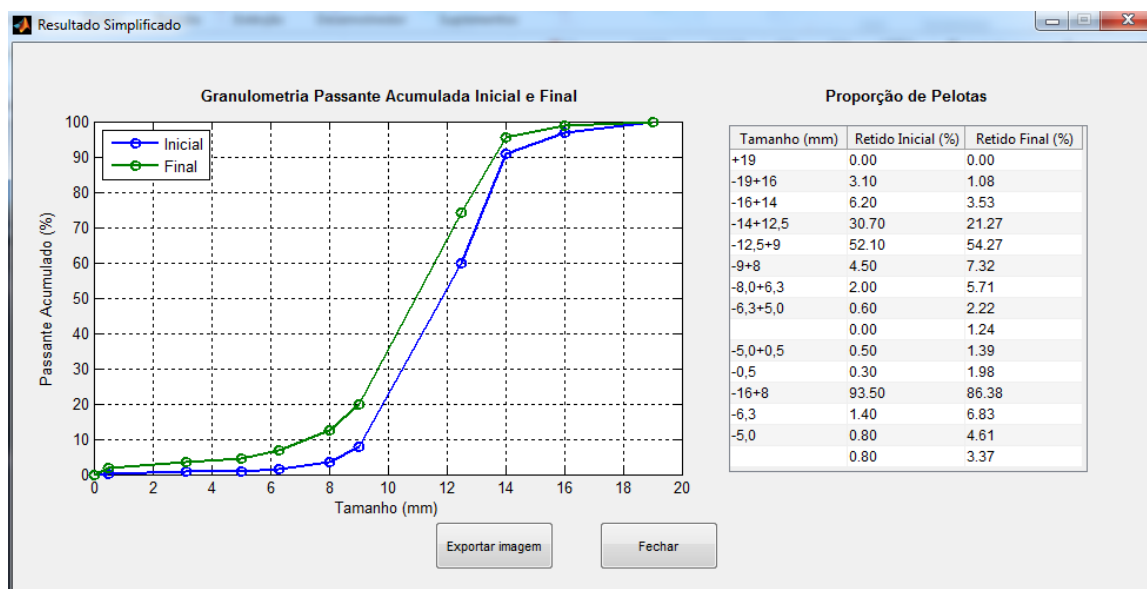


Figura 2. Distribuições granulométricas do material com relação granulométrica igual a 0,7 antes e após o manuseio simulado.

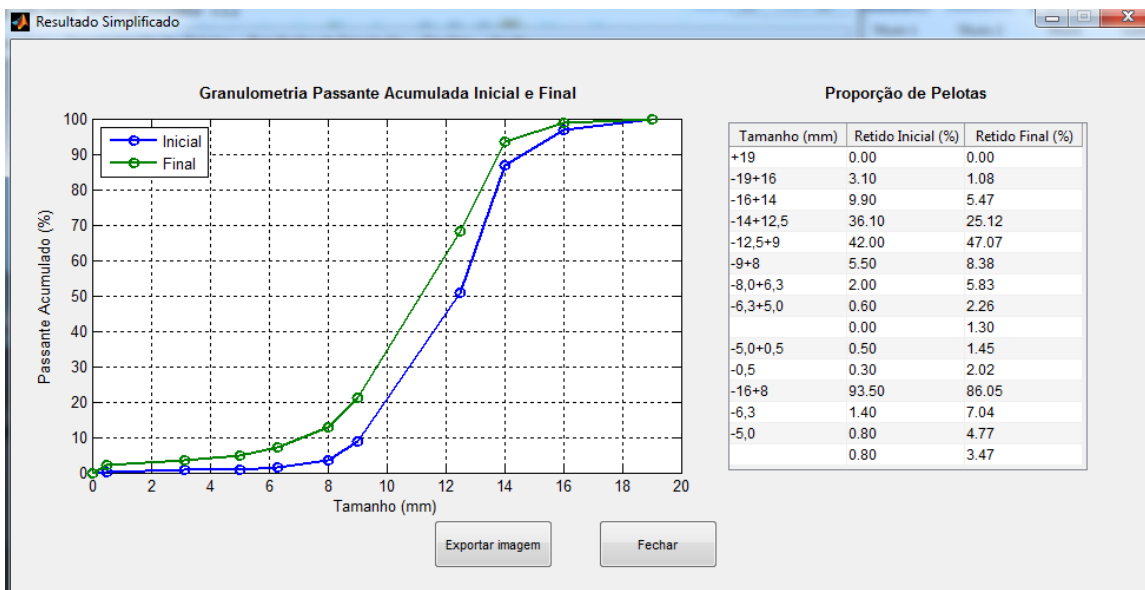


Figura 3. Distribuições granulométricas do material com relação granulométrica igual a 1,1 antes e após o manuseio simulado

A partir desses resultados foi possível propor uma especificação, na qual a principal característica de qualidade alterada foi a relação granulométrica, dada pela razão na proporção de pelotas (%-16,0+12,5mm)/(%-12,5+9,0mm). Assim, o valor típico foi alterado de 1,1, o qual era originalmente estabelecido no contrato de fornecimento, para 0,7.

Desta forma, a nova especificação proposta ao cliente resultou no fornecimento de pelotas com tamanhos mais concentrados na faixa %12,5+9,0mm. Além de apresentar o benefício de reduzir a degradação do material durante o manuseio, esta especificação proporcionou ganhos de produtividade ao produto, tendo em vista que pelota de menor diâmetro faz com que a secagem do material seja mais rápida, aumentando a eficiência do processo durante a etapa de queima no pelotamento (Figura 4) e, conseqüentemente, maior qualidade física. Testes realizados em escala industrial mostraram que, a redução do diâmetro médio (e da relação granulométrica) torna a distribuição granulométrica mais homogênea, proporcionando uma maior produtividade para o processo (Figura 5).

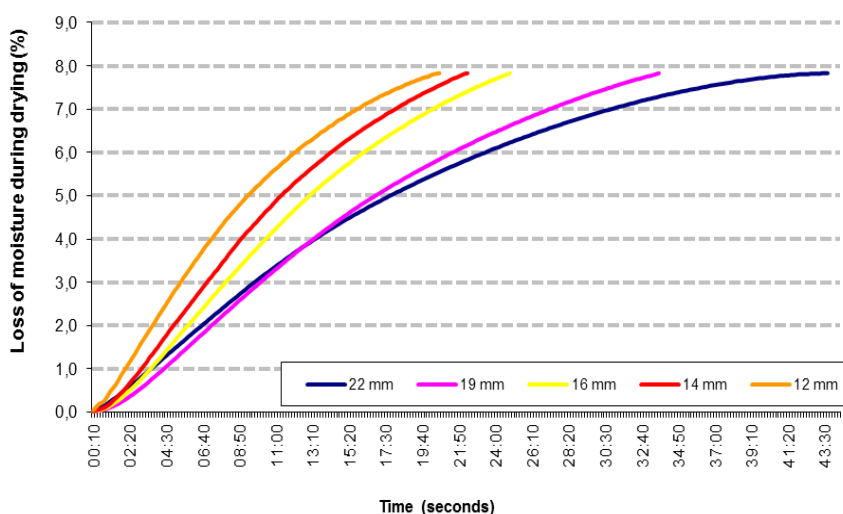


Figura 4. Influência do tamanho médio da pelota no tempo de secagem durante a etapa de queima no pelotamento

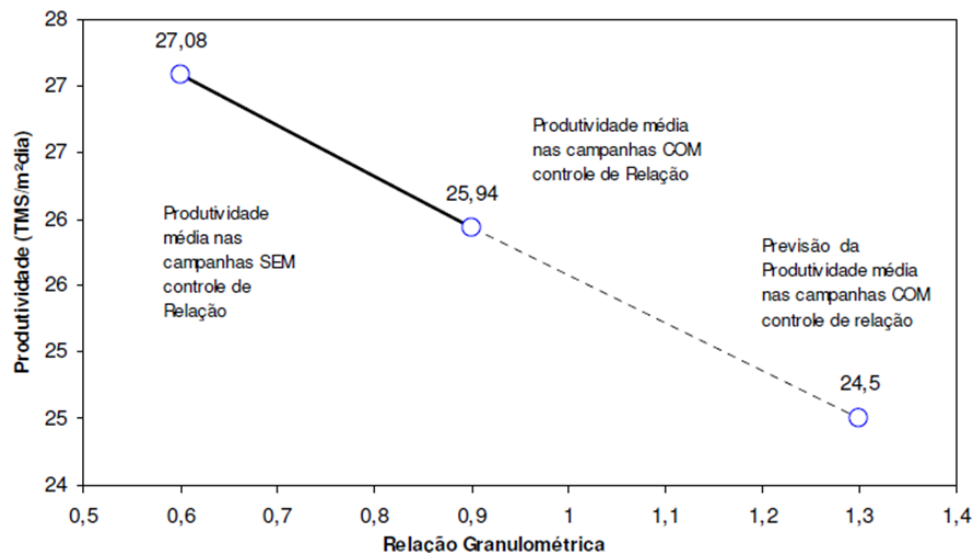


Figura 5. Influência da relação granulométrica na produtividade da usina de pelotização.

3.2. Estudo de Caso 2

Recentemente, a unidade de pelotização foi expandida, o que demandou reavaliar toda a estratégia de expedição e carregamento das embarcações na unidade portuária da empresa, tendo em vista o aumento do volume a ser embarcado. Para isso, duas alternativas foram consideradas nesse projeto de expansão:

- Repotenciamento do shiploader, permitindo seu aumento de capacidade de transporte;
- Implantação de um silo regulador entre o pátio de estocagem e o porto, que permitiria tirar proveito de folgas que existem no sistema de manuseio interno da empresa.

No caso da alternativa (a), não haveria uma alteração substancial na proporção de finos e cacos gerados até o porto em comparação à situação atual, tendo em vista que as modificações nas alturas de queda do sistema de manuseio seriam pequenas. Por outro lado a alternativa (b), de menor custo de investimento que o repotenciamento do shiploader, suspeitava-se que as colisões adicionais que ocorreriam em decorrência do uso do silo resultariam em significativa degradação das pelotas.

A fim de descrever os esforços mecânicos envolvidos nas operações de manuseio das pelotas em chutes de transferência, durante o carregamento das embarcações e durante o armazenamento no interior do silo (alternativa b), foi usada a técnica de simulação do método dos elementos discretos (DEM). Essa técnica permitiu levar em conta as alturas de queda dos chutes, navios e silos nas energias envolvidas nos impactos. A Figura 6 apresenta resultados de simulações em DEM, ilustrando a transferência de pelotas do transportador de correia até o *rock box* (a) e ilustrando o carregamento do silo (b).

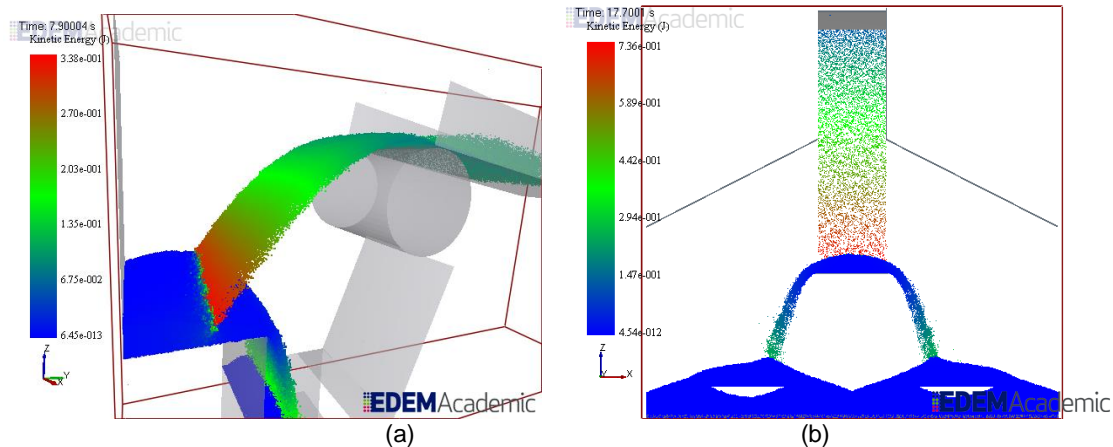


Figura 6. Imagem da simulação do carregamento do chute (a) e do silo de pelota (b) usando o software EDEM®

A etapa de simulação no software de degradação consistiu em simular três cenários:

- Cenário 1: situação atual, incluindo o manuseio no interior da usina (recuperação) e o carregamento de um navio de grande porte (Cape size);
- Cenário 2: situação na qual a expansão da usina acarretaria na inclusão de dois silos de estocagem de pelotas, seguindo o carregamento de um navio de grande porte;
- Cenário 3: situação na qual a expansão da usina acarretaria em aumento da capacidade do *shiploader*, com pequena alteração em um chute de transferência de minério. Esse cenário também conta com o carregamento de um navio de grande porte.

Nessas simulações considerou-se que o minério apresentaria qualidades típicas de pelota de redução direta, ou seja, a presença de 3,2% de material menor que 8 mm (finos), com 80% das pelotas contidas na faixa de 14-9 mm e 8,5 % de cacos. Além das operações detalhadas acima, cada um dos cenários ainda simulou a degradação durante todas operações de manuseio em chutes no pátio do cliente.

A Tabela 2 sintetiza os resultados das simulações, que permitem concluir que:

- Em comparação à situação atual, a introdução de silos em cada uma das linhas de escoamento das pelotas (cenário 2) implicaria no incremento em 0,5% na proporção de finos (<8,0 mm) e em 0,8% na proporção de cacos.
- Para o caso estudado isso representaria a passagem de 4,4% para 4,9% na proporção de finos do produto já carregado no navio que deixa o porto. Se considerada a simulação até o pátio do cliente, a introdução dos silos de armazenamento de pelotas acarretaria em um aumento dos 6,7% correspondentes à condição atual da usina para, aproximadamente, 7,2% de finos.
- Essas previsões para o cenário 2, entretanto, devem ser consideradas otimistas, tendo em vista o fato que a degradação durante a extração das pelotas do silo não pôde ser adequadamente simulada usando o modelo na sua versão atual. Além disso, o modelo também não pôde levar em consideração a degradação que ocorre pela carga estática das pelotas uma vez depositadas sobre aquelas contidas nos extratos mais baixos do silo durante o carregamento. Por outro lado, o silo foi simulado na condição em que o seu carregamento é baixo (aproximadamente 5%), o que é inferior à condição normal de operação (25% de enchimento do silo).

- Em comparação à situação atual, o cenário 3, que incorpora a mudança do *shiploader*, não teria qualquer variação significativa na geração de finos ou cacos, tendo uma tendência marginal (diminuição em 0,03%) de redução na proporção de finos (< 8 mm) gerados.

Tabela 2. Resumo das simulações do estudo de caso 2

Cenário	Estágio de manuseio	- 8 mm			Cacos		
		%	% gerada no manuseio	Diferença em relação à situação atual (%)	%	% gerada no manuseio	Diferença em comparação à situação atual (%)
1	Inicial	3,20	0	-	8,46	-	-
	Carregado no navio	4,43	1,23	-	11,54	3,08	-
	Descarregado no porto	6,71	3,51	-	17,26	8,80	-
2	Inicial	3,20	0	-	8,46	-	-
	Carregado no navio	4,92	1,72	0,49	12,31	3,85	0,77
	Descarregado no porto	7,19	3,99	0,48	17,86	9,40	0,60
3	Inicial	3,20	0	-	8,46	-	-
	Carregado no navio	4,40	1,20	-0,03	11,53	3,07	-0,01
	Descarregado no porto	6,68	3,48	-0,03	17,25	8,79	-0,01

Portanto, o modelo mostrou que, apesar de ser a alternativa de maior custo de investimento, o repotenciamento do *shiploader* permitiria minimizar a degradação durante o manuseio da pelota durante o carregamento, gerando um ganho na qualidade do produto final entregue ao cliente. Essa foi, de fato, a alternativa selecionada pela empresa no projeto.

3.3. Estudo de Caso 3

O terceiro e último estudo de caso tratou do auxílio a uma siderúrgica cliente, situada no Egito, na avaliação das implicações do uso de seu sistema de manuseio peculiar na degradação das pelotas. A peculiaridade se refere ao fato que toda pelota de minério de ferro comprada é descarregada no porto e transportada com caminhões por cerca de 150 km até a usina industrial (Figura 7).

Utilizando o simulador de degradação, foi possível avaliar o impacto na geração de finos em cada etapa do processo. De acordo com as simulações, a utilização de *grabs* na etapa de descarga e o transporte do material por caminhões iria aumentar a intensidade da degradação de pelotas. Com isso, foi possível propor procedimentos operacionais que minimizassem a degradação do material durante o manuseio.

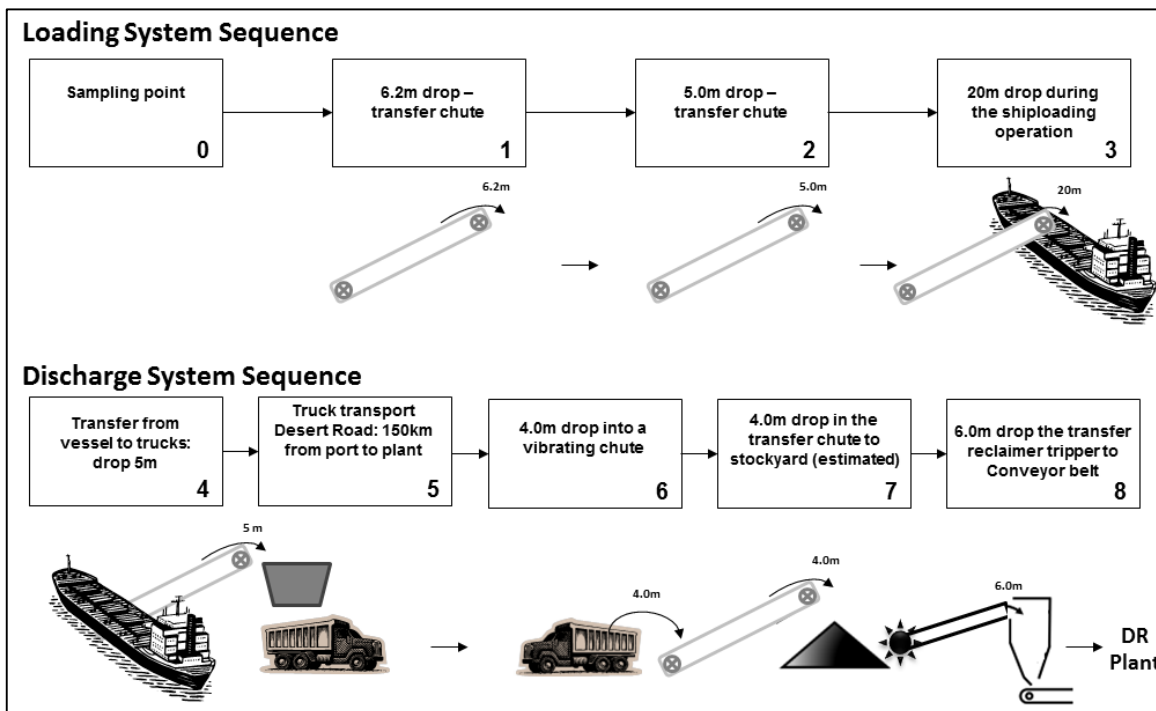


Figura 7. Fluxograma de manuseio desde a empresa pelletizadora até o pátio do cliente, localizado no Oriente Médio

Para a etapa do descarregamento do navio, as simulações mostraram que, quanto maior a altura de descarga, maior seria a degradação do material (Figura 8). Com isso, foram realizados treinamentos com a equipe do porto, conscientizando-os da importância em reduzir ao máximo esta altura durante a operação dos grabs.

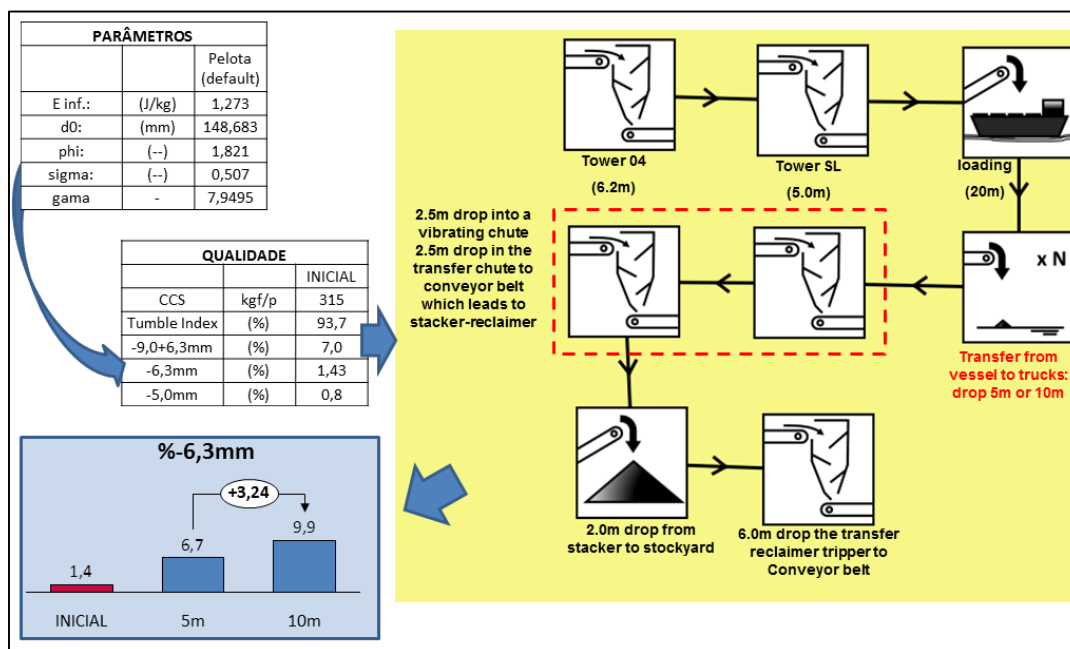


Figura 8. Simulação da etapa de descarga

Outra etapa crítica na degradação foi o transporte do material por caminhões do porto até a planta industrial (Figura 9), pois o impacto do material sobre a superfície metálica do caminhão gera uma degradação significativa. A Figura 10 apresenta os resultados das simulações da degradação da pelota para diferentes superfícies de impacto em

uma altura de 10 metros de queda. Ela demonstra que o impacto em superfície de aço é a que mais gera degradação.



Figura 9. Transporte por caminhões até a planta industrial

Degradação por diferentes superfície de impacto

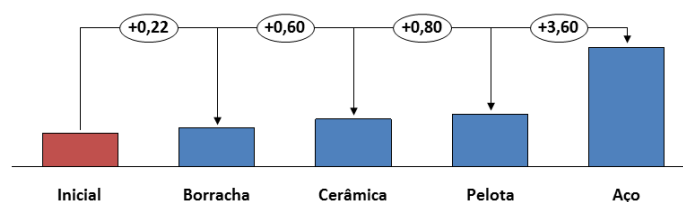


Figura 10. Resultados das simulações da geração de finos em diferentes superfícies de impacto

Com o intuito de minimizar a degradação durante o transporte do porto até a planta industrial, foi proposta uma ação imediata de cobrir a caçamba da frota de 60 caminhões com borracha de correia transportadora. Esta ação teria o potencial de reduzir significativamente as perdas pela degradação nesta etapa do processo.

4 CONCLUSÃO

Três estudos de caso foram realizados, com o objetivo de demonstrar o tipo de utilização que a Samarco já faz do simulador de degradação de pelotas (Parte 1 desse trabalho). Inicialmente foi apresentado um caso no qual o uso das metodologias de caracterização do presente trabalho permitiu embasar a recomendação da empresa produtora de reduzir o tamanho médio das pelotas fornecidas ao cliente, resultando em benefícios para ambos. O segundo estudo de caso tratou do uso da simulação na comparação de alternativas para a expansão de capacidade da unidade portuária da empresa, demonstrando que, embora mais dispendioso, o repotenciamento do shiploader deveria ser escolhido em comparação à implantação de silos de estocagem, causariam degradação excessiva. O terceiro estudo de caso tratou do apoio a um cliente, situado no Egito, na realização de modificações no seu sistema de manuseio a fim de minimizar a degradação de pelotas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Samarco Mineração pelo financiamento da pesquisa e pela autorização para publicação do trabalho. L.M. Tavares e R.M. de Carvalho agradecem ao CNPq e à CAPES pelas bolsas de estudos e pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 Tavares, L.M., de Carvalho, R.M., da Silveira, M.W., Pereira, H.C., Bianchi, M.R., Otaviano, M.M., Degradação mecânica de pelotas de minério de ferro durante o manuseio e transporte. Parte 1: Modelo matemático e simulador. Anais, 16º Simpósio de Minério de Ferro, Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, Rio de Janeiro.