



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



José Hamilton Resende Tavares

**FATORES DE DEGRADAÇÃO DE UM GRANULADO DE MINÉRIO DE FERRO
CANADENSE**

Ouro Preto

2017

José Hamilton Resende Tavares

**FATORES DE DEGRADAÇÃO DE UM GRANULADO DE MINÉRIO DE FERRO
CANADENSE**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz

Ouro Preto

2017

T231f Tavares, José Hamilton Resende.
Fatores de degradação de um granulado de minério de ferro canadense
[manuscrito] / José Hamilton Resende Tavares. - 2017.

72f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Minério de ferro. 2. Materiais granulados. 3. Simulação por computador.
I. Luz, José Aurélio Medeiros da . II. Universidade Federal de Ouro Preto. III.
Titulo.

CDU: 622.79



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 19 dias do mês de setembro de 2017, às 09 horas, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado “**FATORES DE DEGRADAÇÃO DE UM GRANULADO DE MINÉRIO DE FERRO CANADENSE**”, pelo aluno **José Hamilton Resende Tavares**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz (orientador)**, **Prof. M.Sc. Felipe de Orquiza Milhomem** e **Prof. M.Sc. Marcus Alexandre Carvalho Winitskowski da Silveira**.

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela ~~aprovação~~ *aprovação* do candidato, com a nota *9,5* concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 19 de setembro de 2017.

J. A. Medeiros da Luz

Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador

Felipe de Orquiza Milhomem

Prof. M.Sc. Felipe de Orquiza Milhomem
Membro da Comissão Avaliadora

Marcus Alexandre de C. W. da Silveira

Prof. M.Sc. Marcus Alexandre Carvalho Winitskowski da Silveira
Membro da Comissão Avaliadora

José Hamilton Resende Tavares

José Hamilton Resende Tavares

José Fernando Miranda

Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

RESUMO

Além de altos teores de ferro e baixa contaminação, um dos fatores críticos quanto a qualidade dos granulados de minério de ferro é a participação das partículas de granulometria inferior a 6,3 mm, os chamados finos. Tal fração granulométrica é indesejada por prejudicar a permeabilidade dos gases redutores presentes nos reatores dos processos siderúrgicos, possuindo, portanto, implicações financeiras ao produtor quando a mesma ultrapassa os limites especificados. Dessa forma, uma mineradora de ferro canadense tem buscado a redução dos níveis de finos presentes em seu granulado, uma vez que os mesmos tem tido sua porcentagem aumentada devido à degradação física do minério durante os processos de manuseio. Portanto, visando o conhecimento do comportamento do material ao longo de tais processos, diversos testes foram realizados de forma emergencial, permitindo análises e conclusões que atendessem às necessidades imediatas da empresa. Assim, foi verificado que a distribuição granulométrica e tipológica do material possui primordial influência sobre seu comportamento durante o manuseio. Neste caso, frações granulométricas intermediárias (entre 15 e 6,3 mm) são as maiores responsáveis pela geração de finos (-6,3 mm). De modo geral, não há evidências de que as condições intempéricas testadas tenham apresentado influências sobre o comportamento do material durante manuseio. Além disso, a estabilização dos índices de degradação do material, após os estágios iniciais de manuseio, está relacionada ao “alívio” dos estresses mecânicos, inicialmente contidos no mesmo, assim como o efeito de amortecimento dos finos sobre partículas grossas. Comparando-se os resultados dos testes desenvolvidos, foi possível o desenvolvimento de uma fórmula que permitiu simulações dos efeitos do manuseio, com base nas características iniciais do material. Mudanças na planta local foram também simuladas, utilizando o *software* USIM PAC[®], e os resultados cruzados com aqueles provenientes das simulações dos efeitos do manuseio, determinando as condições ideais de operação que promoverão a produção de um granulado mais resistente à degradação por manuseio, garantindo a qualidade física do mesmo ao atingir seu destino final. Além disso, são aconselháveis estudos adicionais, buscando um aperfeiçoamento das simulações dos efeitos do manuseio, são indicados pelo presente trabalho, podendo levar não apenas à previsão dos exatos efeitos do manuseio, mas também às distribuições granulométricas e tipológicas ótimas em que o material apresente a mínima degradação ao longo dos processos de manuseio.

Palavras-chave: manuseio. degradação. distribuição granulométrica. simulações.

ABSTRACT

Besides high grades of iron and low grades of deleterious elements, one of the key quality indicators of a lump iron ore is the fines content, particles below 6.3 mm. Such size fraction is unwanted as it can lead to gas permeability reduction within the steel making process, having financial implications to the producer when its limit is exceeded. In this way, a Canadian iron ore mining company is seeking the reduction of its lump ore fines contents, which increased values are related to degradation during handling process. Therefore, aiming a better understanding of the behavior of such material under handling conditions, several tests were performed, allowing analysis and conclusions capable of meeting the immediate needs of the company. In this case, it was confirmed that particle size and typology distribution have paramount influence on handling effects. Intermediate size fractions (-15 +6.3 mm) are the major responsible for the fines generation. In general, there is no evidence that the weathering conditions tested have influence on the handling process results of the studied ore. Furthermore, the stabilization of its degradation rates, after initial handling stages, is related to the “relief” of mechanical stress contained within the particles, due previous processes, as well as the cushioning effects of fines on coarse particles. Comparing the results of performed tests, it was possible to develop a formula which allowed handling effects simulations, based on the material's initial characteristics. Local beneficiation plant modifications were also simulated, using the software USIM PAC[®], and the results crossed with the ones provided by handling effects simulations, determining operational ideal conditions capable of producing a highly resistant lump, guaranteeing its physical quality at final destination. In addition, advisable further studies, aiming to improve handling effects simulations, are indicated by the present research work, potentially leading not only to an accurate prediction of handling effects, but also to an optimal particle size and typology distribution able to minimize handling degradation.

Keywords: handling. degradation. particle size distribution. simulations.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Distribuição granulométrica original do granulado de minério de ferro canadense | 24 |
| Figura 2: Critério utilizado para a classificação tipológica em quatro grupos de partículas: Compactas, Acamadadas, Porosas e “Outras” | 26 |
| Figura 3: Equipamento artesanal destinado ao Teste de Impacto | 27 |
| Figura 4: Fluxograma da planta de beneficiamento simulada | 30 |
| Figura 5: Porcentagem de partículas abaixo de 6,3 mm geradas durante os Testes de Queda | 31 |
| Figura 6: Relação entre os fatores de amostras submetidas a diferentes condições iniciais durante os Testes de Quedas | 34 |
| Figura 7: Relação entre fatores de amostras submetidas a Testes de Tamboramento com duração de 3 minutos | 36 |
| Figura 8: Relação entre fatores de amostras submetidas a Testes de Tamboramento com duração de 6 minutos | 38 |
| Figura 9: Relação entre fatores de amostras submetidas a Testes de Tamboramento com duração de 9 minutos | 38 |
| Figura 10: Relação entre fatores de amostras submetidas a Testes de Tamboramento com duração de 12 minutos | 39 |
| Figura 11: Relação entre fatores de amostras submetidas a Testes de Tamboramento com duração de 15 minutos | 39 |
| Figura 12: Porcentagem acumulada de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm geradas durante os Testes de Tamboramento | 40 |
| Figura 13: Distribuição tipológica por fração granulométrica | 42 |
| Figura 14: Subgrupos de partículas destinadas aos Testes de Impacto | 43 |
| Figura 15: Subgrupos de partículas destinadas aos Testes de Impacto | 43 |
| Figura 16: Subgrupos de partículas após Testes de Impacto | 44 |
| Figura 17: Subgrupos de partículas após Testes de Impacto | 44 |
| Figura 18: Geração de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm durante Testes de Impacto, considerando diferentes tipologias e frações granulométricas | 45 |
| Figura 19: Comparação entre resultados provenientes do Teste de Queda e da Simulação dos Efeitos do Manuseio, considerando as amostras "Naturais – Com presença de finos" | 48 |
| Figura 20: Comparação entre resultados provenientes do Teste de Queda e da Simulação dos Efeitos do Manuseio, considerando as amostras "Naturais - Grossas" | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 21: Comparação entre resultados provenientes do Teste de Queda e da Simulação dos Efeitos do Manuseio, considerando as amostras “Termicamente Tratadas – 5 Ciclos – Úmidas – Com presença de finos” | 49 |
| Figura 22: Comparação entre resultados provenientes do Teste de Queda e da Simulação dos Efeitos do Manuseio, considerando as amostras “Termicamente Tratadas – 5 Ciclos – Úmidas – Grossas” | 49 |
| Figura 23: Resultados do Teste de Tamboramento Sequencial..... | 51 |
| Figura 24: Relação entre a distribuição granulométrica das amostras e o número de quedas às quais as mesmas foram submetidas durante o Teste de Queda Sequencial..... | 52 |
| Figura 25: Relação entre a geração de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm e o número de quedas às quais as amostras foram submetidas durante o Teste de Queda Sequencial..... | 53 |
| Figura 26: Comparação entre resultados provenientes do Teste de Queda Sequencial e da Simulação dos Efeitos do Manuseio – Estágio 1 | 54 |
| Figura 27: Comparação entre resultados provenientes do Teste de Queda Sequencial e da Simulação dos Efeitos do Manuseio – Estágio 2..... | 55 |
| Figura 28: Comparação entre resultados provenientes do Teste de Queda Sequencial e da Simulação dos Efeitos do Manuseio – Estágio 3..... | 55 |
| Figura 29: Distribuição granulométrica original do granulado estudado e de resultados obtidos por simulações feitas utilizando o <i>software</i> USIM PAC® | 58 |
| Figura 30: Influência da abertura das peneiras sobre os valores do Split e geração de finos durante manuseio..... | 59 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Amostra Termicamente Tratada – Grossa - 1..... | 33 |
| Tabela 2: Amostra Termicamente Tratada – Grossa - 2..... | 33 |
| Tabela 3: Distribuição tipológica por fração granulométrica..... | 41 |
| Tabela 4: Geração de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm durante Testes de Impacto, considerando diferentes tipologias e frações granulométricas | 45 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | OBJETIVOS | 12 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 2.1 | INFLUÊNCIA DO NÚMERO E ALTURA DAS QUEDAS | 13 |
| 2.2 | INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE FINOS | 15 |
| 2.3 | INFLUÊNCIA DA SUPERFÍCIE DE IMPACTO..... | 16 |
| 2.4 | INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA INICIAL..... | 17 |
| 2.5 | INFLUÊNCIA DA TIPOLOGIA DO MINÉRIO | 19 |
| 2.6 | INFLUÊNCIA DOS DIFERENTES MECANISMOS DE MANUSEIO | 19 |
| 2.7 | INFLUÊNCIA DE AÇÕES INTEMPÉRICAS..... | 21 |
| 3 | AMOSTRAGEM | 23 |
| 4 | MÉTODOS..... | 25 |
| 4.1 | TESTE DE QUEDA..... | 25 |
| 4.2 | TESTE DE TAMBORAMENTO..... | 25 |
| 4.3 | ANÁLISE TIPOLÓGICA | 26 |
| 4.4 | TESTE DE IMPACTO | 27 |
| 4.5 | SIMULAÇÕES DOS EFEITOS DO MANUSEIO..... | 28 |
| 4.6 | TESTE DE TAMBORAMENTO SEQUENCIAL..... | 28 |
| 4.7 | TESTE DE QUEDA SEQUENCIAL..... | 29 |
| 4.8 | SIMULAÇÕES – USIM PAC [®] | 29 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 31 |
| 5.1 | TESTE DE QUEDA..... | 31 |
| 5.2 | TESTE DE TAMBORAMENTO..... | 36 |
| 5.3 | ANÁLISE TIPOLÓGICA | 41 |
| 5.4 | TESTE DE IMPACTO..... | 42 |
| 5.5 | SIMULAÇÕES DOS EFEITOS DO MANUSEIO..... | 46 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.6 | TESTE DE TAMBORAMENTO SEQUENCIAL..... | 51 |
| 5.7 | TESTE DE QUEDA SEQUENCIAL..... | 52 |
| 5.8 | SIMULAÇÕES – USIM PAC [®] | 57 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 60 |
| | REFERÊNCIAS | 64 |
| | APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA ORIGINAL | 66 |
| | APÊNDICE B – DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS RESULTANTES DOS TESTES DE IMPACTO | 66 |

1 INTRODUÇÃO

A viabilidade e economicidade de uma mineração de ferro pode ser relacionada, dentre vários fatores, à qualidade e quantidade de granulado produzido (-32 +6,3 mm), desejando-se que sua proporção em relação aos outros possíveis produtos, *sinter feed* (-6,3 +0,15 mm) e *pellet feed* (-0,15 mm), seja a máxima possível, devido ao seu alto valor comercial e baixo custo de produção. Sendo de absoluta necessidade então que os parâmetros da planta de beneficiamento e de toda a operação de mina estejam adequados para a produção de um granulado que atenta aos critérios de mercado, garantindo assim sua comerciabilidade e aumentando a lucratividade do empreendimento.

Neste caso, além de altos teores de ferro e baixa contaminação, um dos fatores críticos quanto à qualidade de granulados de minério de ferro é a participação das partículas de granulometria inferior a 6,3 mm, os chamados finos. Tal fração granulométrica é indesejada por prejudicar a permeabilidade dos gases redutores presentes nos reatores dos processos siderúrgicos. Dessa forma, a quantidade de finos contidos em um determinado minério possui um valor máximo aceitável, definido por meio de acordos contratuais, e penalidades são aplicáveis caso o limite seja excedido.

Dessa forma, uma mineradora de ferro canadense tem buscado a redução dos níveis de finos presentes em seu granulado. Sendo que o mesmo conta com um altíssimo teor de ferro e baixa contaminação, além de ser de fácil processamento, contando apenas com processos de britagem, peneiramento e blendagem, devido à sua excepcional qualidade. Assim sendo, apesar do granulado em questão ser produzido com uma altíssima qualidade química e física, a quantidade de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm tem demandado atenção, por estar comprometendo a qualidade do produto em seu destino final.

Neste caso, o aumento da quantidade de finos presente em tal granulado tem sido creditado à degradação do mesmo durante processos de manuseio. Sendo tais processos intensificados por altas taxas de estocagem do material em questão, uma vez que o mesmo permanece estocado por longos períodos devido às condições climáticas locais, que impedem o escoamento da produção em certas épocas do ano.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de compreender o comportamento de um granulado de minério de ferro canadense durante processos de manuseio e mudanças climáticas. Assim, as causas de seu elevado índice de degradação durante tais processos poderão ser conhecidas, avaliando-se principalmente a resistência ao impacto e abrasão sofrida por amostras do material estudado em condições diversas.

Para a obtenção de tal conhecimento, diversos testes foram realizados, porém, como os mesmos aconteceram em ritmo emergencial, devido às necessidades da empresa, não foi possível atender as normas vigentes para a reprodução dos testes e análises aqui desenvolvidos. Neste caso, foi considerado que mesmo não atendendo tais normas os resultados ainda assim seriam válidos, uma vez que já demonstrariam de forma global as tendências de comportamento do material em questão, atendendo às necessidades imediatas da empresa. Portanto, também é objetivo do presente trabalho indicar um caminho para estudos futuros mais precisos, que buscarão atender de forma categórica todas as normas e requisitos para a execução de tais testes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo dos anos, diversos autores se dedicaram ao estudo do comportamento de sólidos granulados durante condições de manuseio. Dessa forma, foram estabelecidos alguns fatores que podem exercer influência sobre a degradação de tais materiais ao longo dos processos de manuseio: número e altura das quedas, presença de finos, superfície de impacto, distribuição granulométrica inicial, tipologia do minério, mecanismos de manuseio e ações intempéricas.

2.1 INFLUÊNCIA DO NÚMERO E ALTURA DAS QUEDAS

A degradação de granulados de minério de ferro durante manuseio vem sendo creditada principalmente às quedas sofridas pelo mesmo durante tal processo. Fagerberg e Sandberg (1973), após estudos envolvendo amostragens de carregamentos de minério de ferro, de tamanho variando entre 2.000 à 20.000 toneladas, em diferentes pontos ao longo dos processos de manuseio, apontaram que a degradação de granulados é principalmente causada pelo impacto sofrido pelo material durante carregamentos e descarregamentos, e em uma menor magnitude por compressão e abrasão. Além disso, os autores apontam a resistência mecânica do material como a propriedade física mais influente em tais processos, seguida por densidade, tamanho de partícula, distribuição granulométrica e conteúdo inicial de finos.

Dessa forma, baseando-se no resultado de tais amostragens, Fagerberg e Sandberg (1973) continuaram seus estudos em laboratório, utilizando equipamentos como uma calha de 20 metros de altura e um “tubo giratório”, especialmente desenhado para permitir repetidos tombos de 2 metros. Testes de abrasão ocorreram por meio de tamboramento.

Os autores perceberam que com um aumento do número de quedas, as quais o material é submetido, há uma mudança gradual da distribuição granulométrica da amostra. Assim, partículas mais grossas se fraturam e tem sua porcentagem global na amostra reduzida, partículas medianas mantêm uma participação razoavelmente estável, enquanto há um aumento significativo de partículas finas. Os testes apontaram que após uma queda de 130 m,

a amostra analisada teve sua porcentagem de partículas de granulometria abaixo de 5 mm aumentada de 1 para 25 %. Demais testes demonstraram também que a porcentagem de tais partículas finas aumenta de 2 a 6 % após uma queda de 20 m. Por meio desses resultados, Fagerberg e Sandberg (1973) chegaram a conclusão de que um reduzido número de quedas a grandes alturas causam o mesmo efeito que um maior número de quedas, porém menores, desde que as mesmas ultrapassem 5 m de altura. Dessa forma, os autores indicam que durante o planejamento de novas plantas busque-se também uma redução na altura das quedas dos materiais granulados ao longo dos processos de manuseio. Segundo esta linha, também é indicado que os silos sejam mantidos cheios, evitando quedas de alturas demasiadas, mesmo que tal medida aumente a abrasão durante o descarregamento.

Além disso, Fagerberg e Sandberg (1973) ainda discorreram sobre a busca pelo aumento da capacidade de transportadores em geral. Tal aumento de capacidade traz como consequência o também aumento da altura de queda do material, elevando assim sua degradação. Dessa forma, os autores indicam o uso de alimentadores que possam ter sua altura ajustada, contribuindo para a amenização de tal problema.

Waters, Vince e Mahoney (1989), também estudaram a relação entre a degradação do material e o número de quedas sofridas. Uma das análises comparava o resultado proveniente de uma única queda de 30 m ao resultado obtido por múltiplas quedas cuja soma de sua altura totalize 30 m. Por exemplo, seis quedas de 5 m ou dez quedas de 3 m, utilizando amostras de granulado de minério de ferro. Assim, por meio de diversos testes e análises foi determinado que há um ponto mínimo na “curva de degradação” do material, apontando que para quedas superiores a 3 m, a taxa de geração de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm, os chamados finos, aumenta significativamente. Tal resultado está alinhado ao trabalho de Norgate, Tompsitt e Batterham (1986), que já haviam proposto que a substituição de uma grande queda por múltiplas pequenas tem resultados positivos sobre a diminuição da degradação do material, contrariando os achados de Fagerberg e Sandberg (1973). Da mesma forma, Teo, Waters e Nicol (1990), também demonstraram em seus estudos a relação direta entre a altura de queda e a taxa de degradação durante processos de manuseio de materiais como *sinter*, coque, carvão e granulado de minério de ferro.

Sahoo e Roach (2005c) em seus estudos sobre o carvão mineral observaram que não há uma tendência clara entre a degradação do mesmo em quedas inferiores a 2 m, creditando ao fato

de que em pequenas quedas o estresse provocado pelo impacto é relativamente baixo, havendo uma menor extensão de quebras volumétricas e um aumento da significância de quebras superficiais. Por outro lado, há um aumento significativo da degradação do material quando submetido a quedas de altura crescente (5, 7,5 e 10 m), sendo tal aumento relacionado às quebras volumétricas.

2.2 INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DE FINOS

Fagerberg e Sandberg (1973) apontam em seus estudos que a taxa de degradação por manuseio é reduzida com a diminuição do percentual de partículas grossas, e consequente aumento de finos, seja ao longo dos tombos ou tendo esta como característica inicial. Dessa forma, as partículas finas presentes no material promovem o chamado efeito de amortecimento nas partículas grossas, levando a uma redução de sua taxa de degradação. Em seus testes, houve uma redução de 40 % de degradação quando a porcentagem inicial de finos na amostra passou de 0 para 30 %.

Dessa forma, Fagerberg e Sandberg (1973) aconselham que a britagem e peneiramento ocorram preferencialmente de maneira tardia ao longo dos processos de manuseio e transporte. Tal recomendação se deve a um possível aproveitamento do efeito de amortecimento promovido pelos finos que assim também irão compor a carga, permitindo uma redução da degradação das frações mais grossas.

Além disso, Waters, Vince e Mahoney (1989) também apontaram que a presença de finos junto ao granulado de minério de ferro promove o já descrito efeito de amortecimento durante o manuseio, o que é demonstrado comparando-se amostras de granulado com um maior percentual de finos com amostras com o percentual menor. Dessa forma, é possível perceber que a presença inicial de finos nas amostras influencia na quantidade de finos adicionais gerados durante as quedas. Comparando-se resultados provenientes de quedas de 5 e 10 m, tal amortecimento apresentou-se mais notável em quedas de alturas mais elevadas, sugerindo que a presença de finos atua ainda mais favoravelmente em impactos de alta velocidade. Sahoo, Weedon e Roach (2004a) e Sahoo e Roach (2005b) também apontaram o efeito de

amortecimento como importante fator ao longo dos processos de manuseio de materiais granulados.

Em seus experimentos Sahoo e Roach (2005c) compararam resultados de Testes de Tamboramento de carvão mineral avaliando a influência da presença de finos sobre a degradação de partículas grossas. Para isso, dois cenários foram analisados: em ambos, as amostras foram peneiradas a cada intervalo de teste de 2 minutos, porém no primeiro apenas as frações grossas retornavam ao teste, enquanto que no segundo as duas alíquotas foram retornadas, grossos e finos, sendo que o tempo total de teste foi de 20 minutos. Dessa forma, foi possível confirmar o efeito de amortecimento da degradação de partículas grossas por meio de partículas finas. Tais resultados concordam com as conclusões de Teo, Waters e Nicol (1990) em seus Testes de Tamboramento de amostras de *sinter*.

2.3 INFLUÊNCIA DA SUPERFÍCIE DE IMPACTO

Waters, Vince e Mahoney (1989) analisaram a influência de diferentes superfícies de impacto na geração de finos durante testes de queda utilizando amostras de granulado de minério de ferro, sendo elas: chapa horizontal de aço, chapa de aço com diferentes inclinações, borracha e por fim, uma superfície formada por uma monocamada do próprio granulado estudado. Em seus estudos, os autores constataram que a mudança da superfície de impacto não influencia de forma significativa a taxa de degradação do material em questão.

De maneira similar, Sahoo e Roach (2005b) também estudaram a degradação de carvão mineral quando submetido a quedas sobre diferentes superfícies, em seus testes as seguintes foram utilizadas: chapa de aço, correria de borracha e uma pilha formada pelo próprio minério. Dessa forma, os autores apontaram uma maior degradação de amostras submetidas a quedas sobre uma chapa de aço, quando comparadas às amostras cujas quedas ocorreram sobre correria de borracha e superfície formada pelo próprio minério, contrariando os achados de Waters, Vince e Mahoney (1989). Porém, em amostras com alta porcentagem de finos, diferenças de resultados entre as superfícies de impacto testadas passam a não ser significativas.

Além disso, Sahoo e Roach (2005c) estudaram a influência da massa das amostras por meio de quedas de mesma altura de amostras com distribuições granulométricas idênticas. Neste caso, foi verificado que um aumento da massa da amostra, de 10 Kg para 15 Kg, promoveu uma redução da degradação durante a queda. Os autores associam tal redução ao fato de que, considerando a amostra de menor massa, um maior percentual das partículas colidem contra a chapa de aço que se encontra na base da torre de testes. Já durante a queda da amostra de maior massa, uma maior porcentagem de partículas cai sobre outras partículas, sendo que estas últimas ainda não atingiram um estado estático após sua queda. Dessa forma, a colisão de partículas em estado dinâmico permite uma menor degradação quando comparada à uma situação em que a colisão ocorre contra uma chapa de aço estática. Tal conclusão concorda com os resultados e discussões apresentadas por Teo, Waters e Nicol (1990).

2.4 INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA INICIAL

Norgate, Tompsitt e Batterham (1986) indicaram em seus estudos que partículas grossas podem apresentar taxas de degradação inferiores às aquelas exibidas por partículas de menores granulometrias. Tal anunciado contraria a “teoria de quebra de Griffith”, uma vez que tal “teoria” diz que a resistência das partículas é dependente da quantidade de rachaduras ou falhas contidas nas mesmas. E sendo que a probabilidade de partículas de maior tamanho conterem uma maior quantidade de rachaduras ou falhas é alta, quando comparadas às partículas de granulometrias inferiores, esta teoria conclui, portanto, que a resistência das partículas diminui com o aumento de seu tamanho (GRIFFITH, 1920).

Por meio de seus formulismos, Norgate, Tompsitt e Batterham (1986) deduziram que partículas de granulometria intermediária (-10+6 mm) promovem uma maior geração de finos que partículas de granulometria grossa (-30+20 mm) durante processos de manuseio. Tal ocorrência se deve principalmente devido ao fato de que partículas de granulometria intermediária se apresentam próximas ao limite da definição de finos (-6,3 mm), indicando que um menor número de quebras seriam suficientes para que tais partículas passem a pertencer ao grupo dos finos, enquanto que, mesmo após a degradação de partículas grossas,

as partículas resultantes de tal fragmentação ainda assim possuem uma maior probabilidade de continuarem com granulometria superior a 6,3 mm.

Portanto, a distribuição granulométrica apresenta-se como um dos fatores determinantes da taxa de degradação do minério. Neste caso, havendo uma maior porcentagem de partículas de granulometria próxima à dos finos em um determinado minério, o mesmo apresentará uma maior degradação que outro minério predominantemente formado por partículas grossas, mesmo considerando que ambos possuam as mesmas tipologias e porcentagens iniciais de finos (NORGATE, TOMPSITT e BATTERHAM, 1986).

Anteriormente, Fagerberg e Sandberg (1973) já haviam atentado para o fato de que, ao se manter um controle sobre a porcentagem de finos gerada ao longo do processamento do minério, é de grande importância também controlar as frações imediatamente superiores à 6,3 mm. Os enunciados de tais autores seguem os mesmos raciocínios daqueles posteriormente descritos por Norgate, Tompsitt e Batterham (1986).

Sahoo e Roach (2005c), por sua vez, analisaram o efeito da distribuição granulométrica de amostras de carvão mineral sobre a degradação do mesmo em processos de manuseio. Seus resultados apontaram que para pequenas quedas (de alturas menores que 2,5 m), não há diferenças significativas entre o comportamento de partículas de diferentes granulometrias. Por outro lado, testes utilizando alturas superiores (5 m, 7,5 m e 10 m) apontaram notórias diferenças entre o comportamento de diferentes granulometrias. Em seus testes, partículas grossas apresentaram taxas de degradação consideravelmente maiores que partículas de granulometrias inferiores.

Teo, Waters e Nicol (1990) em seus estudos sobre o tamboramento de amostras de *sinter* observaram que a degradação das partículas foi diretamente proporcional à distribuição granulométrica das amostras, onde frações grossas sofreram uma maior degradação. Além disso, os autores apontaram que tal relação também está presente nos testes de queda. Portanto, ao passar por pontos de transferência, as partículas mais grossas apresentariam maiores taxas de degradação. Tal prerrogativa está relacionada ao fato de que quanto maior a partícula, maior o número de fraturas internas, favorecendo sua quebra e concordando com a já anunciada “teoria de quebra de Griffith”.

Por outro lado, por meio de testes de impacto utilizando aparelhos de pêndulo duplo, Weedon e Wilson (2000) em seus estudos sobre minério de ferro e Sahoo, Weedon e Roach (2004b) em seus estudos sobre a degradação granulométrica de amostras de carvão, apontaram que a geração de finos aumenta com a diminuição do tamanho de partícula.

2.5 INFLUÊNCIA DA TIPOLOGIA DO MINÉRIO

A tipologia do minério analisado apresenta grande influência sobre o comportamento do mesmo durante condições de manuseio. Comparando-se minérios compostos predominantemente por tipologias mais resistentes com minérios de tipologias mais friáveis, é possível notar diferenças drásticas na quantidade de finos gerados durante o manuseio, principalmente quando se avaliam valores acumulados após um alto número de quedas (NORGATE, TOMPSITT e BATTERHAM, 1986).

2.6 INFLUÊNCIA DOS DIFERENTES MECANISMOS DE MANUSEIO

Waters, Vince e Mahoney (1989) assinalaram que durante processos de manuseio a geração de finos, partículas de granulometria inferior a 6,3 mm, tem sua distribuição granulométrica relacionada ao mecanismo de manuseio predominante. Neste caso, manuseios onde impactos de alto estresse são predominantes, quedas de cerca de 10 m, tentem a gerar uma maior porcentagem de “finos grossos”, pertencentes às frações granulométricas imediatamente inferiores a 6,3 mm, e, conseqüentemente, uma menor porcentagem de partículas muito finas (-0,25 mm). Já durante manuseios em que o mecanismo predominante é o atrito, representado em seus estudos por ciclos de “carregamento e descarregamento” de alturas de 0,1 m, os finos gerados são majoritariamente pertencentes às frações granulométricas inferiores a 0,25 mm.

Segundo Sahoo e Roach (2005c), entende-se como “quebra volumétrica” aquela em que uma determinada partícula é quebrada, fraturada, ao longo de suas linhas de fraquezas, produzindo assim um número de fragmentos de granulometria inferior. Já a “quebra superficial” é o

desgaste superficial da partícula, principalmente devido à processos abrasivos, promovendo em um efeito de arredondamento da partícula inicial e geração de fragmentos consideravelmente finos. Neste caso, a maior diferença entre os dois mecanismos se baseia na diferença entre a distribuição granulométrica de seus produtos, como discutido por Teo, Waters e Nicol (1990). Além disso, como normalmente os processos de manuseio de minérios envolvem um grande número de quedas superiores a 2 m, Teo, Waters e Nicol (1990) e Sahoo e Roach (2005c) apontam que o material estará mais sujeito a sofrer por quebras volumétricas.

Em seus experimentos, Sahoo e Roach (2005c) promoveram de Testes de Tamboramento e, dentre outras análises, compararam a incidência dos diferentes tipos de quebra sobre amostras de carvão mineral. De modo geral, os autores observaram que em Testes de Tamboramento quebras volumétricas ocorrem majoritariamente nos primeiros minutos, enquanto que no intervalo de tempo posterior há predominância de uma degradação superficial.

Teo, Waters e Nicol (1990) e Sahoo e Roach (2005c) também propõem que a maior degradação das amostras durante os primeiros estágios de manuseio está relacionada às fraturas intrínsecas às partículas devido ao estresse mecânico ao qual as mesmas foram submetidas durante processos anteriores. Após tal “alívio”, as partículas continuam passíveis de fraturas volumétricas e superficiais, porém a degradação das mesmas ocorrerá em um ritmo mais ameno.

Teo, Waters e Nicol (1990), em seus estudos sobre *sinter* e coque, validaram a relação entre distribuição granulométrica e altura de queda de materiais granulados com os efeitos de quebra volumétrica sobre os mesmos. Segundo os autores, os mecanismos de quebras volumétricas são intensificados com o aumento de tamanho da partícula, assim como de queda. Tal fator também explica as baixas taxas de degradação para pequenas quedas (<1,8 m), onde o estresse experimentado pelas partículas é relativamente baixo, resultando em uma menor ocorrência de fraturas volumétricas e, conseqüentemente, uma maior relação com os efeitos das fraturas superficiais.

Como apontado por Teo, Waters e Nicol (1990) e Sahoo e Roach (2005c), deve ficar claro que em seus Testes de Tamboramento não foi possível medir a “abrasão” de forma isolada, fraturas superficiais, sem a também ocorrência de fraturas volumétricas. De modo geral, a extensão de um dos mecanismos é também afetada pelo outro. Os mecanismos de quebra são

complexos por natureza, assim como a relação entre eles, como enfatizado por Teo, Waters e Nicol (1990) e Sahoo, Weedon e Roach (2004a).

Além disso, autores como Norgate, Tomsitt e Batterham (1986), Teo, Waters e Nicol (1990), Weedon e Wilson (2000), Sahoo, Weedon e Roach (2004a), Sahoo e Roach (2005a), Sahoo (2007) e Tavares e Carvalho (2012) apresentam modelos que buscam prever o comportamento de determinados minérios granulados sobre condições diversas de manuseio. Dentre tais modelagens, fatores como a altura das quedas, distribuição granulométrica e tipológica, intemperismo, efeito de amortecimento, superfície de impacto e estabilização foram considerados. Devido à complexidade dos mecanismos de degradação e a heterogeneidade dos minérios, torna-se desafiador um acerto universal e preciso de tais modelagens, porém, as mesmas continuam sendo capazes de promover resultados satisfatórios, indicando a pertinência de um maior desenvolvimento de tal área.

2.7 INFLUÊNCIA DE AÇÕES INTEMPÉRICAS

Sahoo e Roach (2005a), em seus estudos sobre carvão mineral, analisaram amostras expostas ao intemperismo por diferentes intervalos de tempo. Após 1, 3, 6, 9 e 12 meses de ações intempéricas, as amostras foram submetidas aos testes de impacto. Tais estudos apontaram que quando submetidas aos mecanismos de manuseio, amostras que passaram por um maior período de exposição às ações intempéricas geraram uma maior quantidade de finos, ou seja, se degradam com maior facilidade. Tal aumento de degradação atinge uma condição estável aos 9 meses de intemperismo, uma vez que amostras submetidas a um período de 12 meses apresentaram resultados similares. Os autores atribuem tal efeito às alterações físicas e químicas causadas pelo intemperismo. Em estudos sobre minério de ferro, Fortes e Pereira (2012) também apontam o desprendimento de poeira como uma das causas de alterações químicas e granulométricas do material.

Como enunciado por Rempel, Marshall e Roering (2016), o intemperismo térmico também é um importante agente de mudanças geomórficas, considerando uma grande escala temporal e repetitivas variações de temperatura. Neste caso, o fraturamento e aumento de porosidade das

rochas ocorre pela mudança de densidade da água durante sua solidificação, uma vez que, enquanto líquida, a mesma percola a rocha por meio de fendas já existentes e promove um aumento das pressões internas nos corpos rochosos ao se congelar. Tal ação é intensificada por ciclos sazonais de maior amplitude e age principalmente sobre as rochas superficiais, visto que as mesmas estão submetidas a maiores variações térmicas. Os autores também afirmam que investigações de campo sobre os efeitos do intemperismo térmico são dificultadas pela lentidão do aparecimento de modificações observáveis.

Dessa forma, visando um aumento do ritmo de tal processo, Lubera (2014) analisou os efeitos do intemperismo térmico sobre diferentes tipos de rochas por meio de simulações laboratoriais, as submetendo a mais de 300 ciclos de congelamento. Para tais simulações, amostras saturadas e submergidas em 2 cm de água destilada foram submetidas a 2 ciclos de congelamento por dia, com uma variação de temperatura entre -5°C e $+10^{\circ}\text{C}$, sendo tais extremos mantidos por períodos de 5 horas. As baterias de análises eram então realizadas após 100 ciclos, visando detectar mudanças nas amostras, assim como na água utilizada, detectando possíveis dissoluções.

Em tal trabalho, Lubera (2014) também aponta a água como principal aliada do intemperismo térmico, sendo que apesar do estresse causado pelas variações térmicas ser importante, é a migração e aumento de 9 % do volume da água durante seu congelamento os principais agentes responsáveis pela redução ou perda de coesão das rochas. Ao início da pesquisa, já foi possível identificar as rochas carbonáticas como as menos resistentes a tal processo, apresentando significativos valores de degradação após cerca de 40 ciclos de congelamento. Sendo também as mesmas as mais sujeitas aos processos de dissolução. Por outro lado, em amostras mais resistentes, como as de quartzito, mudanças estruturais foram observadas apenas por meio de análises utilizando ultrassom, uma vez que as mesmas não apresentaram alterações visíveis mesmo após 300 ciclos de congelamento.

Dessa forma, Lubera (2014) conclui que rochas metamórficas apresentam alto grau de resistência ao intemperismo térmico, enquanto rochas sedimentares e granitos foram levemente degradados e rochas carbonáticas apresentaram alto grau de degradação. Os estudos também demonstraram uma alta influência da porosidade e solubilidade do material com sua susceptibilidade à degradação por ações intempéricas.

3 AMOSTRAGEM

A preparação das amostras visou o direcionamento da mesmas às análises em que variava-se principalmente três fatores: condições térmicas, distribuição granulométrica e presença de água. Como parte dos testes, avaliando a reprodutibilidade, as mesmas foram divididas em grupos compostos de três amostras de 1,5 Kg.

Com relação ao tamanho das amostras, o mesmo foi determinado de modo a permitir testes e análises de forma emergencial, devido à necessidade de solucionar o problema com altos índices de degradação do material de forma imediata. Portanto, como não houve um estudo sobre o tamanho das amostras, de modo que houvesse garantias de que as mesmas representam o comportamento do material em questão de forma inequívoca, o presente trabalho está sendo considerado “um estudo preliminar”. Tal termo demonstra a compreensão da absoluta importância da representatividade das amostras e indica que futuros estudos seguindo tal linha de raciocínio são veemente aconselháveis. Porém, mesmo as atuais amostras não seguindo a normalização de seus tamanhos, como houve um padrão entre elas, permitindo efeitos comparativos, foi considerado que os resultados promovidos pelas mesmas seriam capazes de fornecer as informações necessárias para tomadas de decisões urgentes que levassem à produção de um material de melhor qualidade.

Tendo como objetivo a análise do comportamento do granulado em questão quando submetido às diferentes condições térmicas, as amostras foram divididas nos seguintes grupos:

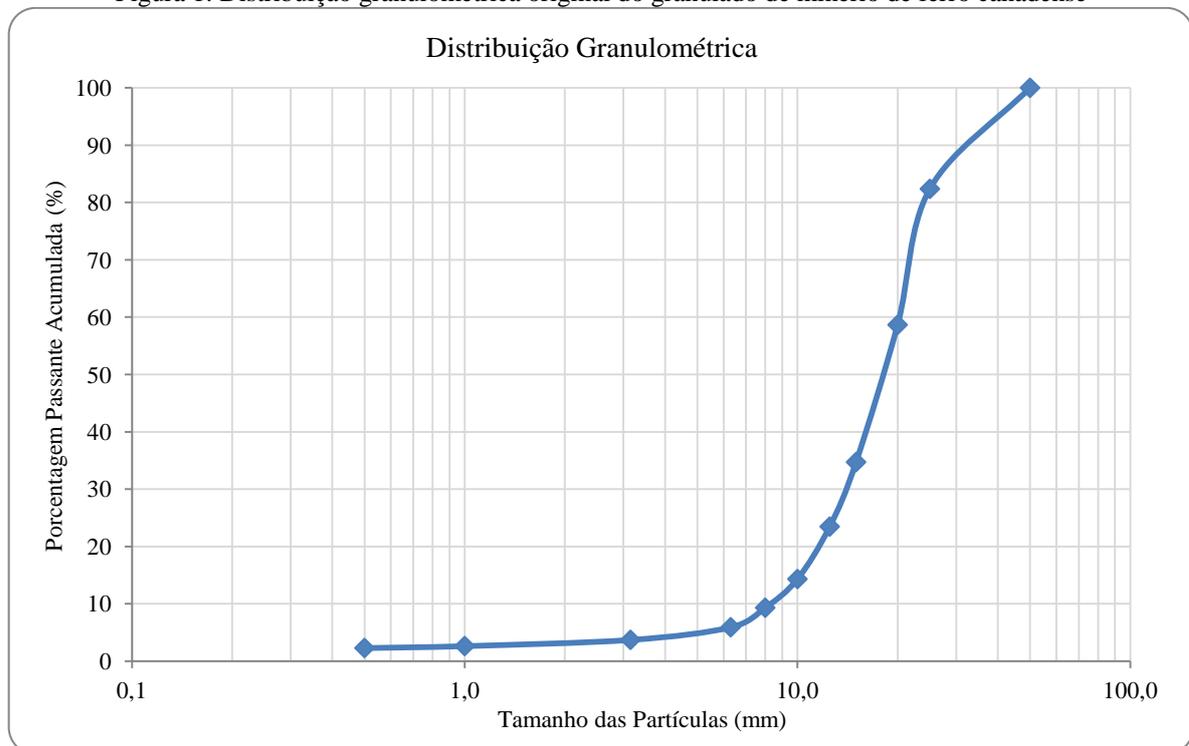
- “**Naturais**” – Amostras à temperatura ambiente;
- “**Congeladas**” – Amostras submetidas a um período de 3 dias a -32°C ;
- “**Termicamente Tratadas**” – Amostras submetidas a um tratamento térmico constituído por 3 dias a -32°C e 3 horas a 105°C , consecutivamente;
- “**Termicamente Tratadas – 5 Ciclos**” - Amostras submetidas a 5 ciclos sucessivos de um tratamento térmico constituído por 3 dias a -32°C e 3 horas a 105°C , consecutivamente.

Além disso, a influência da presença de água também foi analisada. Desta forma, grupos de amostras umedecidas anteriormente ao congelamento, por borrifamento de água, receberam o termo “**Úmidas**” e amostras que permaneceram secas foram denominadas “**Secas**”.

Outro fator também avaliado foi a influência da distribuição granulométrica inicial. Neste caso, amostras preparadas manualmente, reproduzindo a distribuição granulométrica original do granulado em estudo, receberam o termo “**Com presença de finos**”. Da mesma forma, amostras com distribuições granulométricas aleatórias receberam a denominação de “**Grossas**”, pelo fato de não haver presença de finos em tais amostras.

A distribuição granulométrica original do granulado em questão é demonstrada abaixo pela Figura 1, sendo resultado de uma análise granulométrica anterior às pesquisas aqui apresentadas e fornecida pela empresa proprietária do minério. Seu detalhamento consta-se em Apêndice A.

Figura 1: Distribuição granulométrica original do granulado de minério de ferro canadense



4 MÉTODOS

Com o objetivo de melhor entender o comportamento de tal minério durante o manuseio e mudanças climáticas, testes e análises foram realizados baseando-se principalmente na resistência ao impacto e abrasão sofrida por amostras do mesmo em condições diversas.

4.1 TESTE DE QUEDA

Visando avaliar e quantificar a quebra de partículas pelo impacto de partículas entre si, assim como pelo impacto das mesmas contra o chão durante quedas, Testes de Queda foram realizados. Tais testes consistiram em amostras sendo submetidas a duas quedas livres de 9 metros, seguidas por análises granulométricas das mesmas.

Como mencionado anteriormente, amostras submetidas a diferentes tratamentos térmicos, antecedentes aos testes, foram utilizadas e receberam as seguintes denominações: Amostras “Naturais”, “Congeladas”, “Termicamente Tratadas” e “Termicamente Tratadas – 5 Ciclos”.

Amostras com distribuição granulométrica inicial aleatória, “Grossas”, e amostras preparadas manualmente, reproduzindo a distribuição granulométrica original do granulado produzido, “Com presença de finos”, foram usadas, adicionando assim mais uma variável às análises. Tal diferenciação também ocorreu visando a análise da presença de água, com amostras recebendo o prefixo “Úmida” quando inicialmente úmidas e “Seca” quando inicialmente secas. Desta forma, juntamente a influência das condições térmicas, também se analisou a influência da distribuição granulométrica e da presença de água.

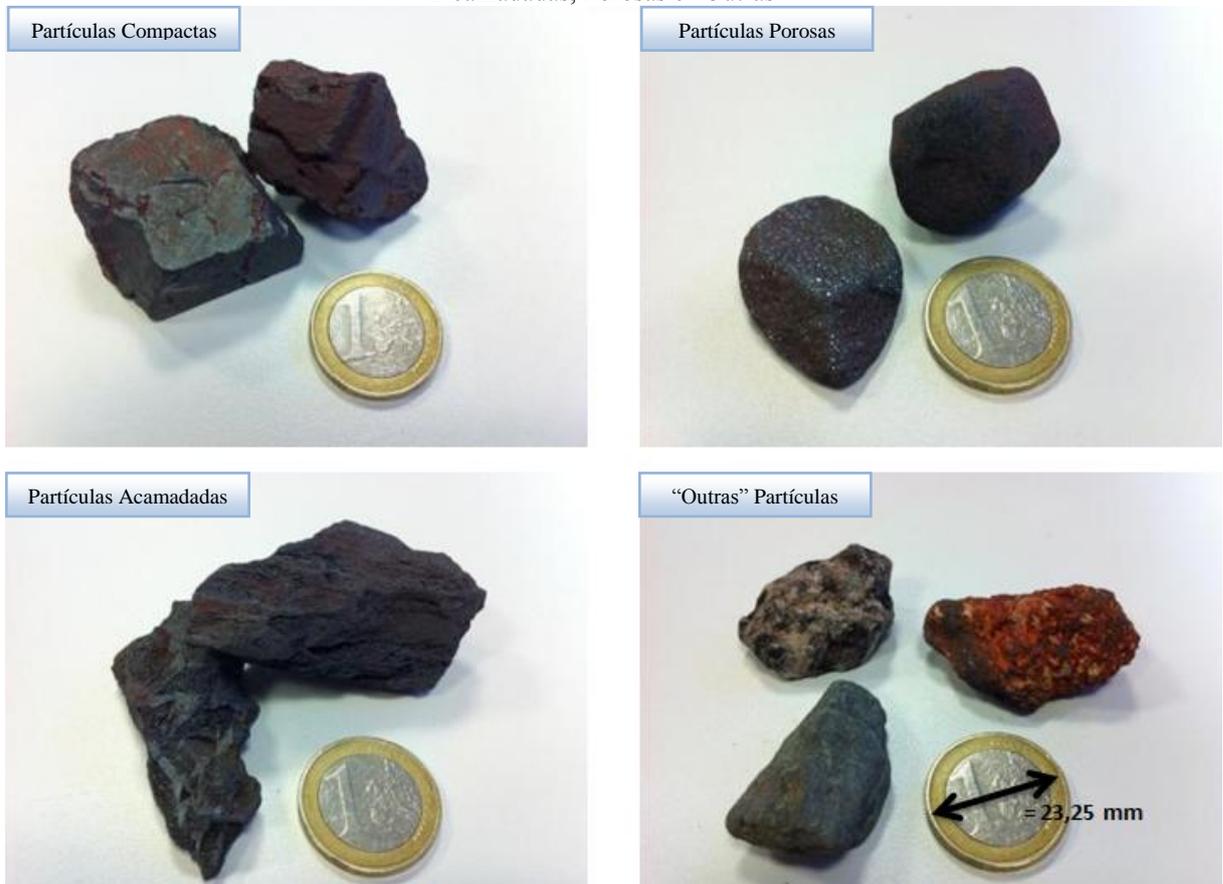
4.2 TESTE DE TAMBORAMENTO

Buscando analisar a resistência à abrasão das partículas, Testes de Tamboramento foram executados. Para tais testes, foi utilizado um misturador de concreto com rotação de 32 rpm, inclinação de 32° e contendo três hastes internas. Neste caso, a preparação das amostras ocorreu da mesma forma como nos Testes de Queda, avaliando assim a influência das condições térmicas, distribuição granulométrica e presença de água. O tempo em que diferentes grupos de amostras ficaram submetidos ao teste também foi analisado como fator crítico, sendo testados intervalos de 3, 6, 9, 12 e 15 minutos.

4.3 ANÁLISE TIPOLOGICA

Para estimar a presença e distribuição de diferentes tipologias no granulado de minério de ferro estudado, uma Análise Tipológica ocorreu seguindo critérios visuais, demonstrados pela Figura 2.

Figura 2: Critério utilizado para a classificação tipológica em quatro grupos de partículas: Compactas, Acamadadas, Porosas e “Outras”



Como pode ser visto, quatro grupos tipológicos principais foram criados: Partículas Compactas, Partículas Acamadadas, Partículas Porosas e “Outras” (consistindo basicamente de partículas de ganga). Neste caso, apesar da fácil distinção entre os grupos, algumas partículas apresentaram características de dois ou mais, dificultando tal categorização. Dessa forma, a denominação de tais partículas se baseou de forma subjetiva, ou seja, no julgamento do operador.

4.4 TESTE DE IMPACTO

Tendo como objetivo a análise da resistência ao impacto das partículas, o Teste de Impacto foi desenvolvido. Tal teste consiste na queda livre de 2,4 m de uma esfera de aço (bola de moinho com diâmetro de 40 mm) de massa 260 g sobre cada partícula, sendo a esfera guiada por um tubo de PVC, como pode ser visto pela Figura 3.

Figura 3: Equipamento artesanal destinado ao Teste de Impacto



Neste caso, apesar dos testes terem ocorrido de maneira em que cada partícula sofreu o impacto de forma individual, a amostra final foi considerada como o agrupamento de 15 partículas de cada tipologia dentro de cada fração granulométrica. Após os testes, tais grupos foram submetidos a análises de distribuição granulométrica.

4.5 SIMULAÇÕES DOS EFEITOS DO MANUSEIO

Através da porcentagem de cada tipologia dentro de cada fração granulométrica, determinada pela Análise Tipológica, e da porcentagem desta última em relação à amostra global, uma simulação foi criada tendo como base os resultados dos Testes de Impacto. Assim, tal simulação tem como objetivo prever os efeitos dos processos de manuseio sobre o material.

Desta forma, a combinação das distribuições granulométricas resultantes de cada subgrupo submetido ao Teste de Impacto deu origem a fórmulas que visam prever o comportamento das partículas em uma amostra global. Logo, era esperado também que tal comportamento pudesse ser comparado àqueles encontrados durante os Testes de Queda.

4.6 TESTE DE TAMBORAMENTO SEQUENCIAL

O Teste de Tamboramento Sequencial segue os mesmos princípios encontrados no Teste de Tamboramento, onde a resistência à abrasão das partículas é avaliada. Neste caso, o atual teste visa verificar a existência de um fim nas mudanças significativas da distribuição granulométrica de um mesmo grupo de amostra e, principalmente, o final das gerações consideráveis de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm durante o mesmo.

Para a realização do teste, foi utilizada uma amostra à temperatura ambiente seguindo a distribuição granulométrica original do granulado estudado. Assim, tal amostra foi submetida a ciclos sequenciais de testes de tamboramento com durações de 3 minutos cada. Desta forma, após cada ciclo, uma análise de distribuição granulométrica foi realizada visando medir as

mudanças na distribuição granulométrica da amostra e avaliar o comportamento das partículas. Como objetivado, os testes cessariam com o fim de significativas variações granulométricas e o tempo total seria considerado como a soma dos tempos dos ciclos individuais realizados.

4.7 TESTE DE QUEDA SEQUENCIAL

Visando conhecer o fim de consideráveis formações de partículas abaixo de 6,3 mm e de mudanças expressivas na distribuição granulométrica de amostras durante Testes de Queda, que avaliam a quebra de partículas pelo impacto de partículas entre si, assim como pelo impacto das mesmas contra o chão durante quedas, tais testes foram assim realizados de forma sequencial.

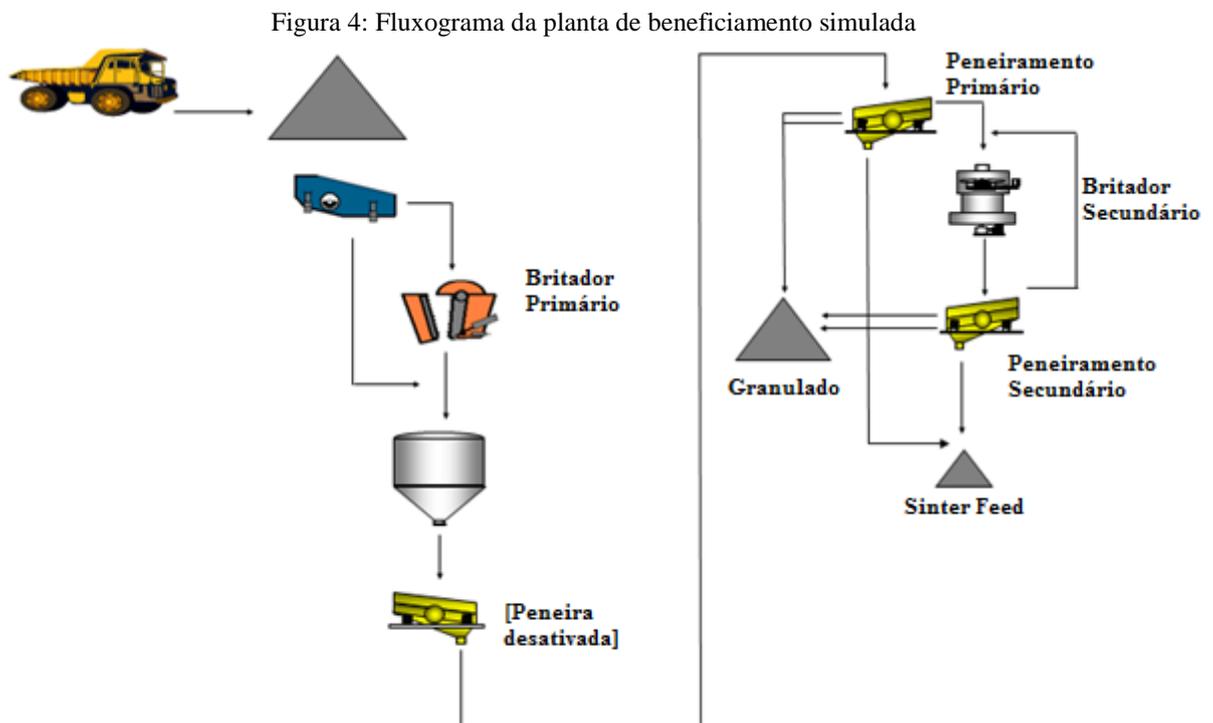
Desta forma, três amostras à temperatura ambiente foram utilizadas. Neste caso, como já de posse dos resultados da Análise Tipológica do material, além da distribuição granulométrica, tais amostras também seguiram a distribuição tipológica original do granulado estudado. Logo, as amostras sofreram ciclos compreendidos por uma queda de 9 metros seguido por uma análise granulométrica, visando entender o comportamento das partículas durante cada queda e determinar o fim de significativas variações na distribuição granulométrica.

4.8 SIMULAÇÕES – USIM PAC[®]

O *software* USIM PAC[®] foi utilizado buscando reproduzir a planta de beneficiamento local, tendo como principal objetivo a simulação dos possíveis resultados obtidos por mudanças nas aberturas das peneiras.

Para executar as simulações, vários parâmetros dos equipamentos utilizados são necessários. Neste caso, embora parâmetros e configurações básicas fossem conhecidas, como a abertura das peneiras e britadores, alguns parâmetros secundários se apresentaram de relativa difícil

obtenção, como por exemplo, a “Tensile Fracture Breakage” e o “Slope of Whiten’s Probability Function”, utilizados na simulação do britador secundário. Tais parâmetros desconhecidos poderiam ser inferidos pelo próprio *software*, porém, para tal ação, deveriam ser conhecidas as distribuições granulométricas antes e depois de cada interação do material com os equipamentos utilizados. Porém como tais distribuições também eram desconhecidas, tais parâmetros foram ajustados por “tentativa e erro”, sendo então escolhida como configuração padrão aquela cujas características granulométricas dos produtos e o Split (divisão) entre granulado e *sinter feed* mais se aproximava da realidade local. Baseando-se em tal configuração padrão, as simulações seguintes visaram avaliar as mudanças inferidas às características dos produtos, assim como ao Split. Desta forma, a Figura 4 apresenta o fluxograma da planta de beneficiamento simulada.



Além disso, um cruzamento de dados entre as Simulações dos Efeitos do Manuseio e as Simulações – USIM PAC[®] também era desejado. Desta forma, foi possível conhecer como os produtos simulados pelo USIM PAC[®] se comportam durante o manuseio.

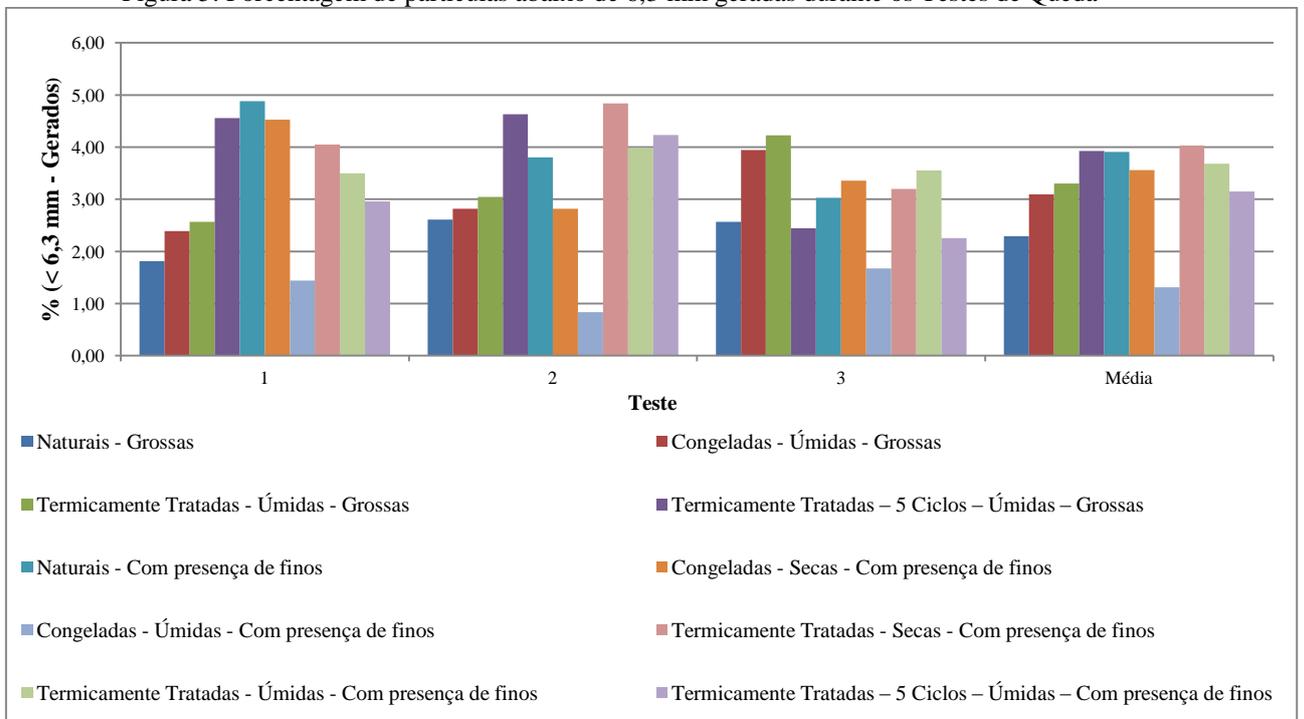
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como pode ser visto, os resultados e discussões baseiam-se principalmente em análises das mudanças nas distribuições granulométricas das amostras, especialmente quando comparadas a suas condições iniciais, assim como na geração de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm.

5.1 TESTE DE QUEDA

Enfocando os resultados dos Testes de Queda na formação de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm de diferentes amostras submetidas a diferentes tratamentos térmicos, o seguinte gráfico foi criado, Figura 5.

Figura 5: Porcentagem de partículas abaixo de 6,3 mm geradas durante os Testes de Queda



O gráfico ilustra a porcentagem, levando em conta a massa total da amostra, que migrou para as frações granulométricas abaixo de 6,3 mm. Neste caso, é possível ver que, com exceção

das amostras pertencentes ao grupo das “Congeladas - Úmidas – Com presença de finos”, nenhum padrão foi seguido por diferentes amostras submetidas a um mesmo tratamento térmico, havendo uma alternância de amostras como mais ou menos resistentes, considerando os diferentes tratamentos. Por exemplo, a amostra do grupo das “Naturais – Com presença de finos”, se apresenta como a menos resistente no primeiro teste (1), mas não mantém tal comportamento nos seguintes (2 e 3). O que não acontece com as amostras “Congeladas - Úmidas – Com presença de finos”, que se apresentam sempre como as mais resistentes à formação de finos.

Neste caso, é considerado que o comportamento das amostras “Congeladas - Úmidas – Com presença de finos” seja devido à formação de uma “superfície de sacrifício” formada pelo gelo ao redor das partículas, assim como a aglomeração das mesmas, também devido ao gelo, se comportando então como um “bloco maciço/único” e não mais como partículas individuais.

Comparando tais resultados com aqueles obtidos pelas amostras “Congeladas - Úmidas – Grossas”, onde, por definição, não há presença de finos, a importância dos mesmos se faz notória. Isso acontece, pois, apesar de conter a mesma quantidade de gelo, tais amostras não se apresentaram tão resistentes quanto aquelas que já possuem finos em sua formação inicial.

Portanto, com exceção das amostras “Congeladas - Úmidas – Com presença de finos”, não há evidências de que os tratamentos térmicos sofridos pelo material tenham tido influência sobre seu comportamento durante processos de manuseio. Tal conclusão está de acordo com os achados de Lubera (2014), que, por meio de seus experimentos, determinou que rochas metamórficas apresentam um alto grau de resistência ao intemperismo. Em seus testes, não foram detectadas mudanças significativas em tais rochas mesmo após 300 ciclos de congelamento, enquanto que no presente trabalho os testes não abordaram mais de 5 ciclos, confirmando assim a ausência de influência dos tratamentos térmicos realizados sobre o comportamento do material perante os testes. Desta forma, a distribuição granulométrica inicial passou a ser melhor estudada.

Como pode ser visto pelas Tabelas 1 e 2, uma substancial variação de resultados é observada entre amostras sujeitas ao mesmo tratamento térmico, tendo a distribuição granulométrica como principal diferença.

Tabela 1: Amostra Termicamente Tratada – Grossa - 1

Termicamente Tratada – Grossa - 1

| Tamanho (mm) | Retido Simples: Inicial (%) | Retido Simples: Final (%) | [Final – Inicial] (%) |
|--------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 25,0 | 12,42 | 10,76 | -1,66 |
| 20,0 | 42,14 | 34,18 | -7,96 |
| 15,0 | 23,85 | 25,12 | 1,27 |
| 12,5 | 10,41 | 11,63 | 1,22 |
| 10,0 | 6,22 | 7,14 | 0,92 |
| 8,0 | 3,66 | 5,22 | 1,56 |
| 6,3 | 1,30 | 2,90 | 1,60 |
| -6,3 | 0,00 | 3,05 | 3,05 |
| Total | 100,00 | 100,00 | 0,00 |

Tabela 2: Amostra Termicamente Tratada – Grossa - 2

Termicamente Tratada – Grossa - 2

| Tamanho (mm) | Retido Simples: Inicial (%) | Retido Simples: Final (%) | [Final – Inicial] (%) |
|--------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 25,0 | 8,10 | 6,18 | -1,92 |
| 20,0 | 28,50 | 25,77 | -2,73 |
| 15,0 | 33,73 | 35,45 | 1,73 |
| 12,5 | 13,88 | 9,28 | -4,60 |
| 10,0 | 9,18 | 10,43 | 1,24 |
| 8,0 | 5,18 | 5,86 | 0,68 |
| 6,3 | 1,43 | 2,80 | 1,38 |
| -6,3 | 0,00 | 4,23 | 4,23 |
| Total | 100,00 | 100,00 | 0,00 |

Analisando e comparando as tabelas, é possível perceber que um aumento na quantidade inicial de partículas na fração granulométrica -15 +6,3 mm (Círculo Azul) é seguido por um aumento por um aumento na quantidade de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm (Círculo Amarelo), formadas durante o teste. Também é possível perceber que a quantidade final de partículas na fração -15 +12,5 mm (Círculo Verde) é influenciada pela quantidade inicial de partículas na fração granulométrica -31,5 +12,5 mm (Círculo Vermelho). Tais relações também foram observadas nas demais amostras sujeitas a diferentes tratamentos térmicos.

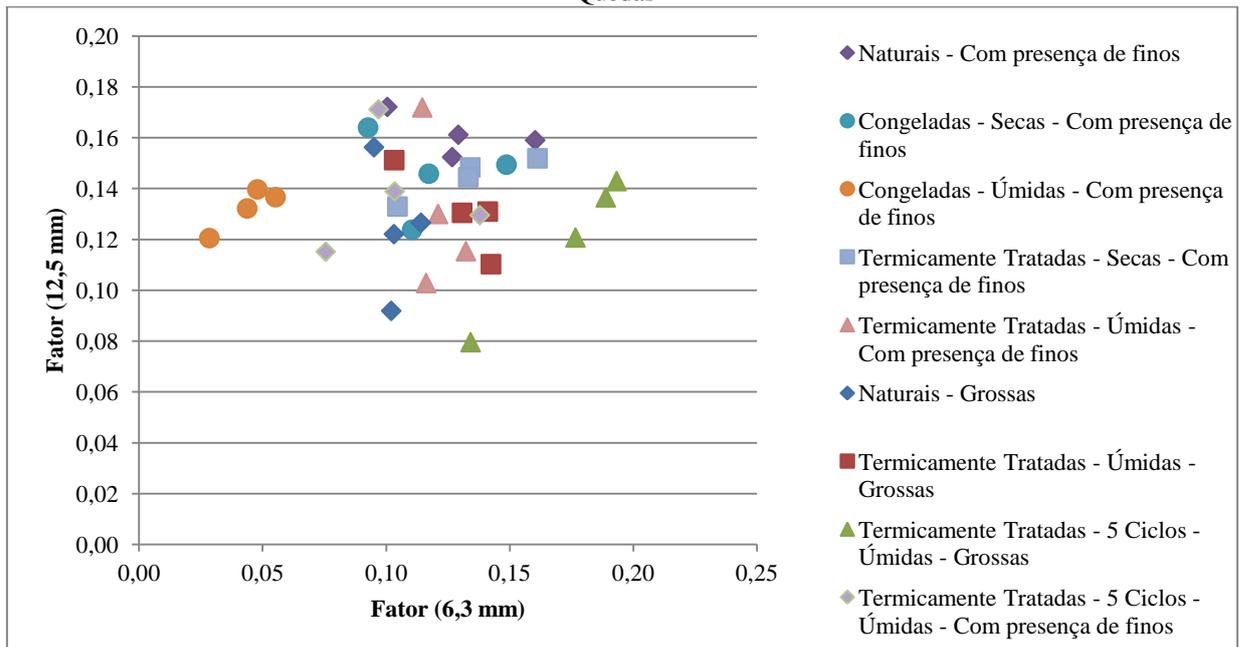
Seguindo este conceito, fatores chamados “Fator 6,3 mm” e “Fator 12,5 mm” foram criados em ordem de estabelecer parâmetros nos quais amostras poderiam ser comparadas.

$$Fator\ 6,3\ mm = \frac{-6,3\ mm\ (Gerada - Condição\ Final)}{\sum +12,5, +10, +8, 6,3\ mm\ (Condição\ Inicial)}$$

$$Fator\ 12,5\ mm = \frac{-15 + 12,5\ mm\ (Condição\ Final)}{\sum +25, +20, +15, 12,5\ mm\ (Condição\ Inicial)}$$

Portando, através de tais fatores, um gráfico foi usado para comparar o comportamento das amostras submetidas ao Teste de Queda, Figura 6. Neste caso, um alto valor do “Fator 6,3 mm”, por exemplo, corresponde a uma formação relativamente alta de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm durante os testes.

Figura 6: Relação entre os fatores de amostras submetidas a diferentes condições iniciais durante os Testes de Quedas



Como é possível observar pelo gráfico, a maioria das amostras são representadas por uma “nuvem central”, validando assim a influência da distribuição granulométrica inicial sobre os resultados.

O gráfico também demonstra de forma clara a tendência seguida pelas amostras “Congeladas - Úmidas - Com presença de finos”. Como pode ser visto, elas se apresentam como as mais

resistentes à formação de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm, uma vez que possuem valores de “Fator 6,3 mm” baixos, quando comparados às demais. Como já mencionado, tal diferença é creditada à “superfície de sacrifício” formada pelo gelo e seu comportamento como “bloco maciço/único”, devido à aglomeração das partículas.

Com exceção da amostra citada acima, as diferenças encontradas entre as demais amostras, que se mantêm mesmo após o uso dos chamados “Fatores”, são creditadas às variações tipológicas apresentadas entre amostras. Neste caso, um aumento do percentual de partículas de tipologias “não - compactas” resultam em um aumento da quantidade de partículas nas frações granulométricas abaixo de 6,3 mm, criadas durante os testes. Tal importância das características tipológicas do minério também foi apontada por Norgate, Tompsitt e Batterham (1986), que discorrem sobre as notórias diferenças de degradação entre partículas friáveis e resistentes durante condições manuseio.

Também é possível observar pelo gráfico que variações nos valores dos “Fatores 12,5 mm” são relativamente mais amplas que aquelas encontradas nos “Fatores 6,3 mm”. Tal diferença é creditada ao tamanho das partículas envolvidas em cada fator, uma vez que como as partículas abrangidas pelo “Fator 12,5 mm” são de maiores dimensões, variações nas mesmas acarretarão uma maior influência nas porcentagens finais.

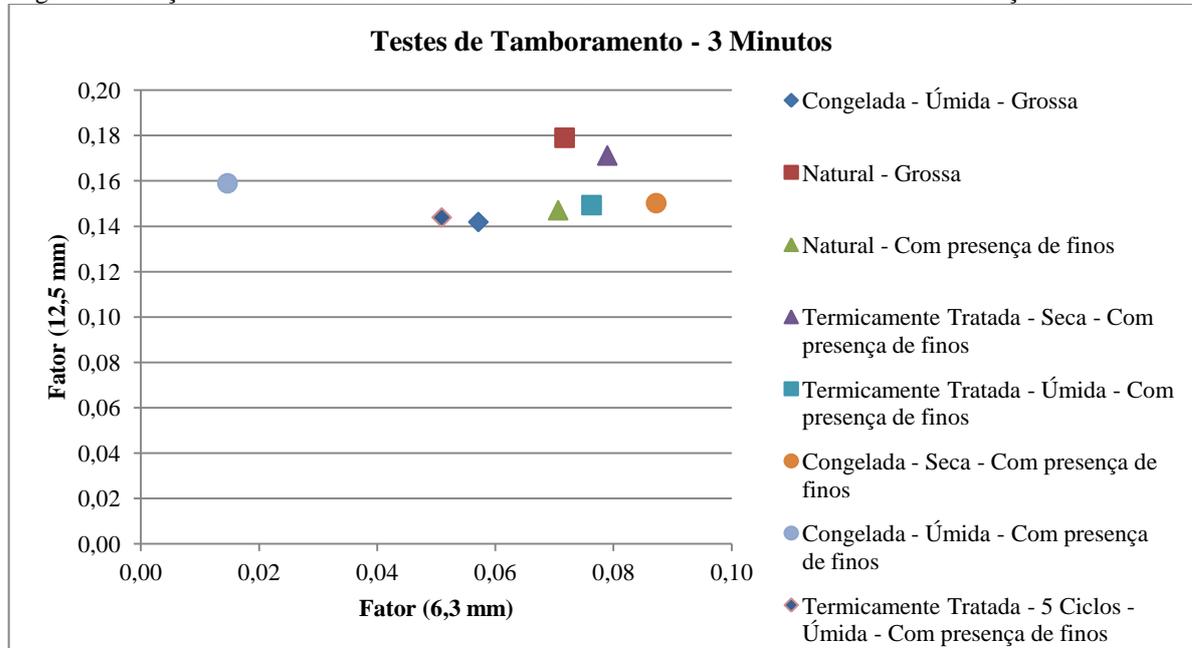
De toda forma, como formalizado pelo “Fator 6,3 mm” e ilustrado pelas tabelas 1 e 2, a formação de finos está fortemente relacionada à fração intermediária de partículas (-15 +6,3 mm). Assim, mesmo que partículas de granulometria grossa (+15 mm) possuam maiores chances de se fraturarem, como descrito por Griffith (1920), tais fraturas terão mais influência sobre a quantidade final de partículas intermediárias, como demonstrado pelo “Fator 12,5 mm”, que sobre a própria geração de finos. Portanto, os presentes resultados seguem as ideias propostas por Fagerberg e Sandberg (1973) e Norgate, Tompsitt e Batterham (1986), que atentam em seus estudos para o fato de que, ao se buscar controle sobre a porcentagem de finos gerada ao longo do processamento do minério, é de grande importância também controlar as frações imediatamente superiores à 6,3 mm.

5.2 TESTE DE TAMBORAMENTO

De forma similar aos Testes de Queda, o “Fator 6,3 mm” e “Fator 12,5 mm” também foram utilizados nos Testes de Tamboramento, visando determinar parâmetros em que amostras com diferentes distribuições granulométricas iniciais pudessem ser comparadas.

Como pode ser visto pela Figura 7, excluindo a amostra “Congelada - Úmida – Com presença de finos”, também há a formação de uma “nuvem”, indicando comportamento semelhantes entre as demais amostras.

Figura 7: Relação entre fatores de amostras submetidas a Testes de Tamboramento com duração de 3 minutos



Tal “nuvem” evidencia que a quantidade de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm, criadas como resultado dos testes, está fortemente relacionada à distribuição granulométrica das amostras. O gráfico também demonstra que as amostras “Congelada - Úmida – Com presença de finos” se apresentam como as mais resistentes. Comparando tal resultado com o obtido pela amostra “Congelada - Úmida – Grossa”, contido na “nuvem”, é possível observar que a presença de finos em condições de congelamento é um dos fatores responsáveis pelo aumento de resistência.

Tais resultados, apontando por meio do “Fator 6,3 mm” a influência das partículas de fração granulométrica intermediária (-15 +6,3 mm), não são necessariamente contrários aos achados de Teo, Waters e Nicol (1990) que em seus estudos sobre o tamboramento de *sinter* observaram que partículas grossas estavam mais sujeitas à degradação, confirmando os enunciados de Griffith (1920). Isso pois, ainda que partículas grossas degradem-se mais durante processos de manuseio, as mesmas terão efeitos primordialmente quanto à quantidade final de partículas intermediárias, enquanto as últimas terão mais influência sobre a de fato maior geração de finos, foco do presente trabalho.

Assim como apresentado pelos resultados dos Testes de Queda, com exceção da amostra “Congelada - Úmida – Com presença de finos”, diferenças entre os valores dos “fatores” das amostras são principalmente creditados à variações de tipologia presentes em diferentes amostras. Neste caso, um aumento da quantidade de partículas “não compactas” leva a um aumento da quantidade de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm criadas durante os testes.

Tal influência das variações tipológicas pode ser facilmente observada através das Figuras 8, 9, 10 e 11, onde apenas amostras com distribuições granulométricas idênticas são analisadas, amostras “Com presença de finos”, e os tempos de teste são respectivamente 6, 9, 12 e 15 minutos. Neste caso, é possível observar a importância das tipologias presentes nas amostras, uma vez que esta se torna a única variável de possível influência nesta situação, já que os tratamentos térmicos são apontados como não influentes, com exceção das amostras “Congeladas - Úmidas – Com presença de finos”, e que a distribuição granulométrica é constante.

Além disso, os gráficos também demonstram que as diferenças entre as amostras “Congeladas - Úmidas – Com presença de finos” e as demais diminuem com o aumento do tempo de teste. Tal tendência está relacionada ao fato de que o aumento do tempo de teste é seguido por um aumento na degradação da “superfície de sacrifício” criada pelo gelo e a desagregação do “bloco maciço/único”, também criado pela presença do gelo, que são creditadas como razões da alta resistência das amostras em questão. Portanto, após o derretimento do gelo, tais amostras passam a se comportar de forma similar às demais.

Figura 8: Relação entre fatores de amostras submetidas a Testes de Tamboramento com duração de 6 minutos

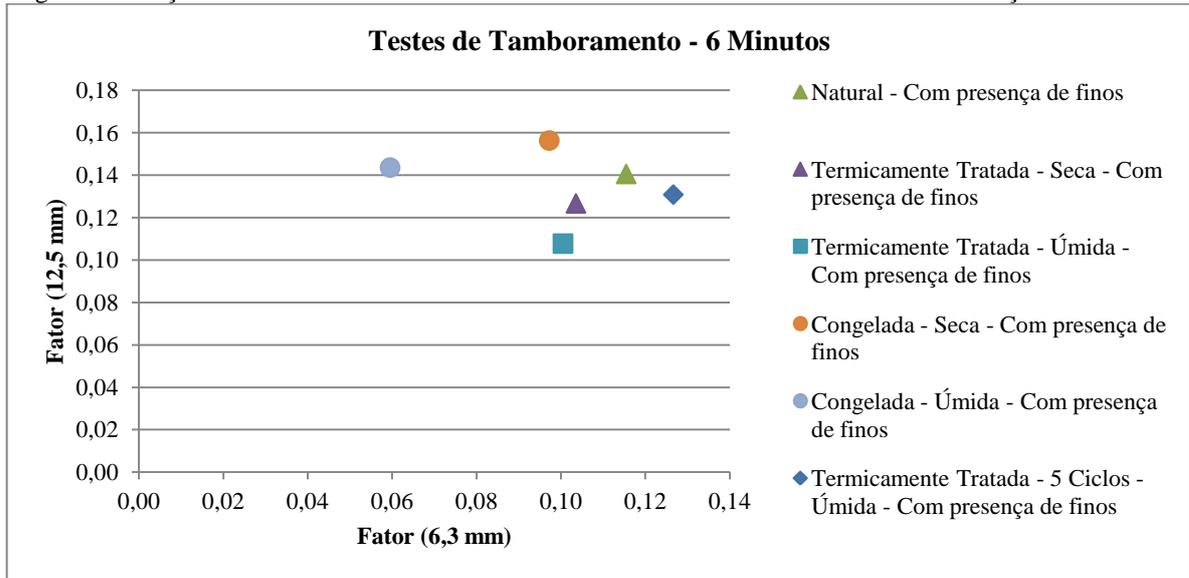


Figura 9: Relação entre fatores de amostras submetidas a Testes de Tamboramento com duração de 9 minutos

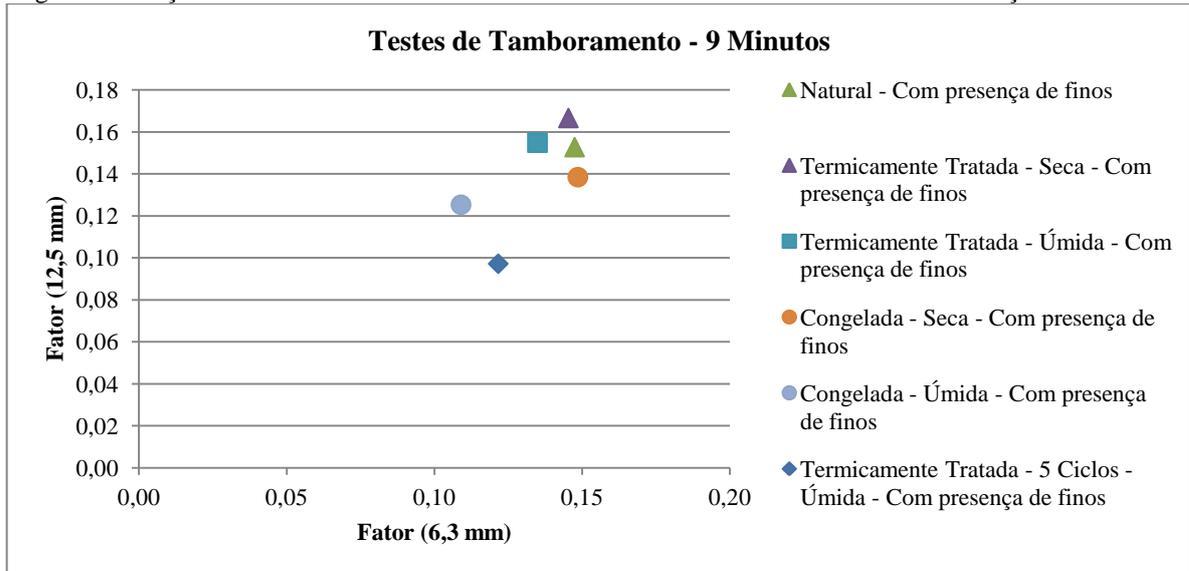


Figura 10: Relação entre fatores de amostras submetidas a Testes de Tamboramento com duração de 12 minutos

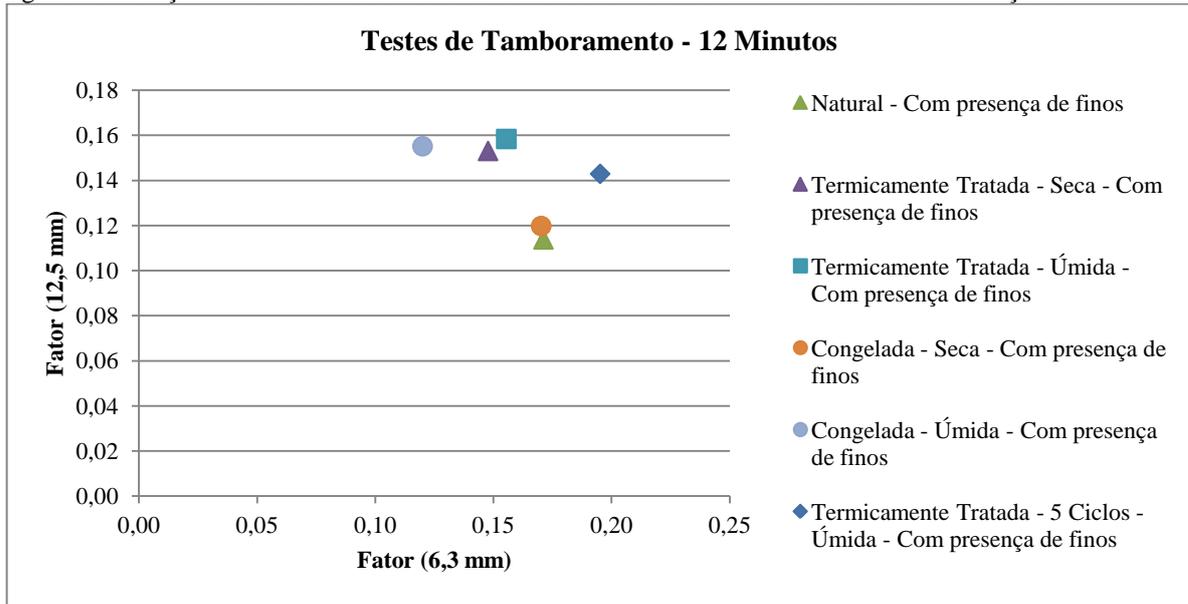
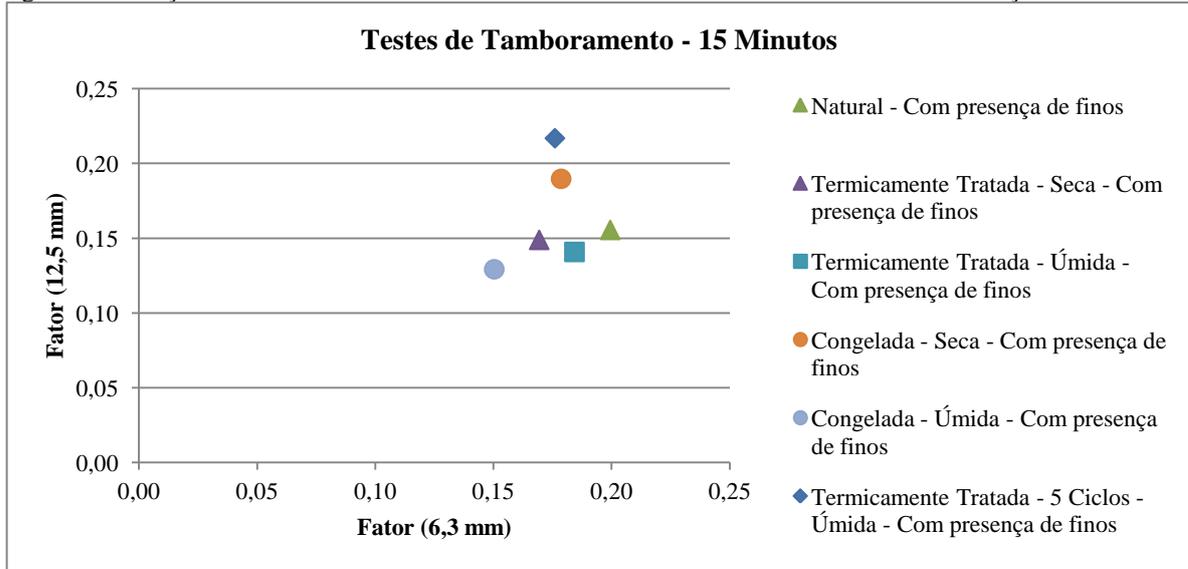


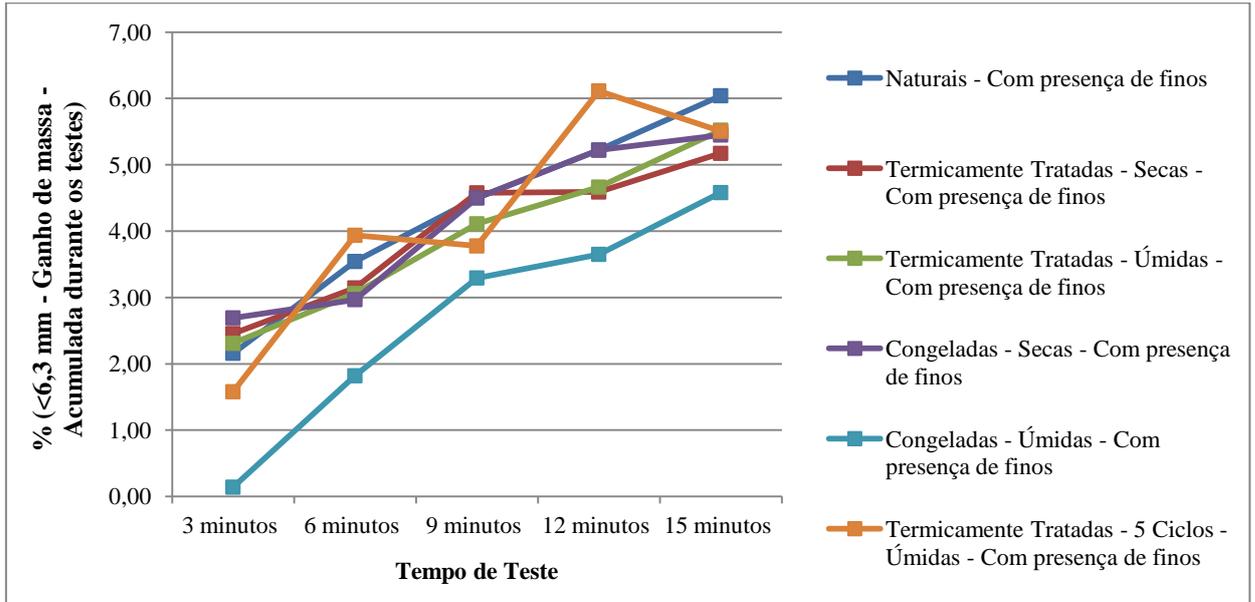
Figura 11: Relação entre fatores de amostras submetidas a Testes de Tamboramento com duração de 15 minutos



Como também já observado durante os Testes de Queda, o “Fator 12,5 mm” apresenta variações relativamente maiores que aquelas apresentadas pelo “Fator 6,3 mm”. Tal fato é creditado à granulometria das partículas abrangidas pelo “Fator 12,5 mm”, uma vez que, sendo as mesmas de maior tamanho, variações tipológicas apresentadas pelas mesmas resultarão em uma maior variação de resultados que variações tipológicas encontradas em partículas de menor tamanho.

Portanto, visando analisar o comportamento de amostras expostas ao mesmo tratamento térmico e de mesma distribuição granulométrica quando submetidas a tempos crescentes de Testes de Tamboramento, assim como comparar os resultados entre diferentes tratamentos térmicos sob as mesmas condições, o seguinte gráfico foi criado, Figura 12.

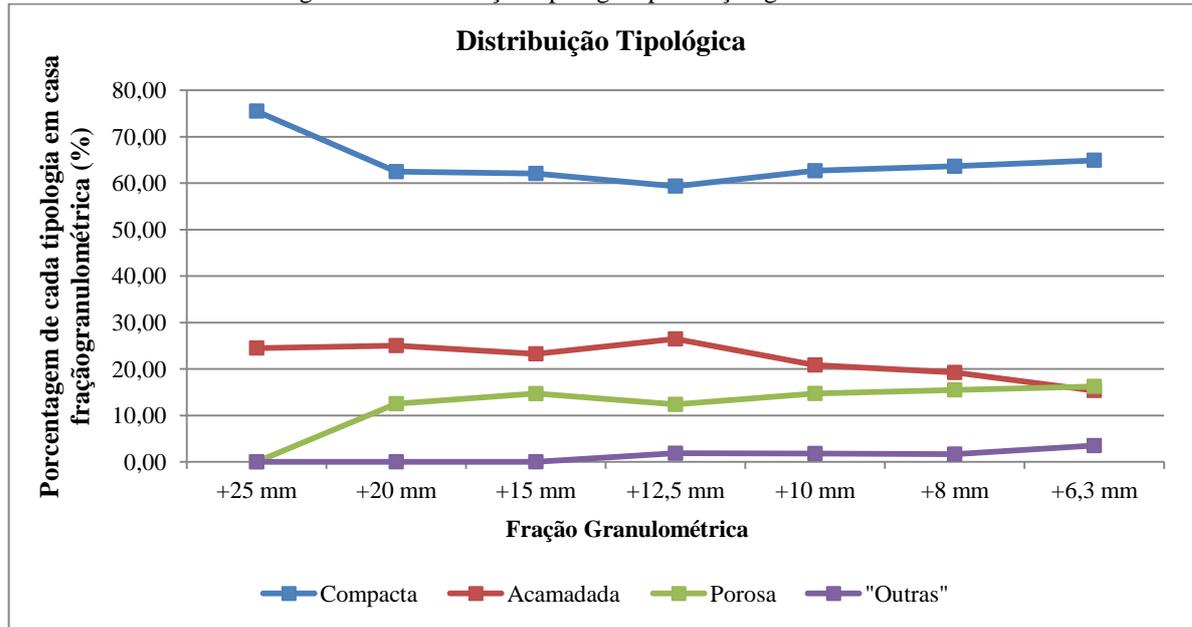
Figura 12: Porcentagem acumulada de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm geradas durante os Testes de Tamboramento



A Figura 12 apresenta a porcentagem, em massa total, de partículas que migraram para a fração granulométrica abaixo de 6,3 mm. Tal figura demonstra claramente que amostras “Congeladas - Úmidas – Com presença de finos” apresentam uma maior resistência em todos os tempos de testes quando comparadas às demais amostras e que tal diferença diminui com o aumento do tempo em que são submetidas a tal teste. O gráfico também demonstra que não há um padrão seguido por amostras submetidas a outros tratamentos térmicos, não havendo amostras que se apresentem como as mais ou menos resistentes à geração de finos em todos os cenários, com exceção da “Congeladas - Úmidas – Com presença de finos”.

Também pode ser observado que, em alguns casos, amostras submetidas ao mesmo tratamento térmico apresentam uma menor geração de finos com o aumento do tempo de teste. Um claro exemplo é o resultado da amostra “Termicamente Tratadas – 5 Ciclos – Úmidas – Com presença de finos”, que após ser submetida a um tempo de teste 15 minutos apresenta uma menor geração de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm que em uma amostra submetida a um tempo de teste de 12 minutos.

Figura 13: Distribuição tipológica por fração granulométrica



Como pode ser visto pela tabela e figura acima, frações granulométricas mais grossas são principalmente compostas por partículas compactas, enquanto há um aumento de partículas porosas nas frações mais finas. Além disso, a Análise Tipológica encontrou que partículas compactas, acamadadas, porosas e “outras” possuem uma participação global média de 62,9 %, 22,4 %, 13,5 % e 1,2 %, respectivamente.

5.4 TESTE DE IMPACTO

As figuras seguintes ilustram o “antes e depois” dos Testes de Impacto, sendo que as Figuras 14 e 15 apresentam os subgrupos de partículas antes de serem submetidas aos testes, enquanto que as Figuras 16 e 17 exibem os resultados visuais após os mesmos.

Figura 14: Subgrupos de partículas destinadas aos Testes de Impacto

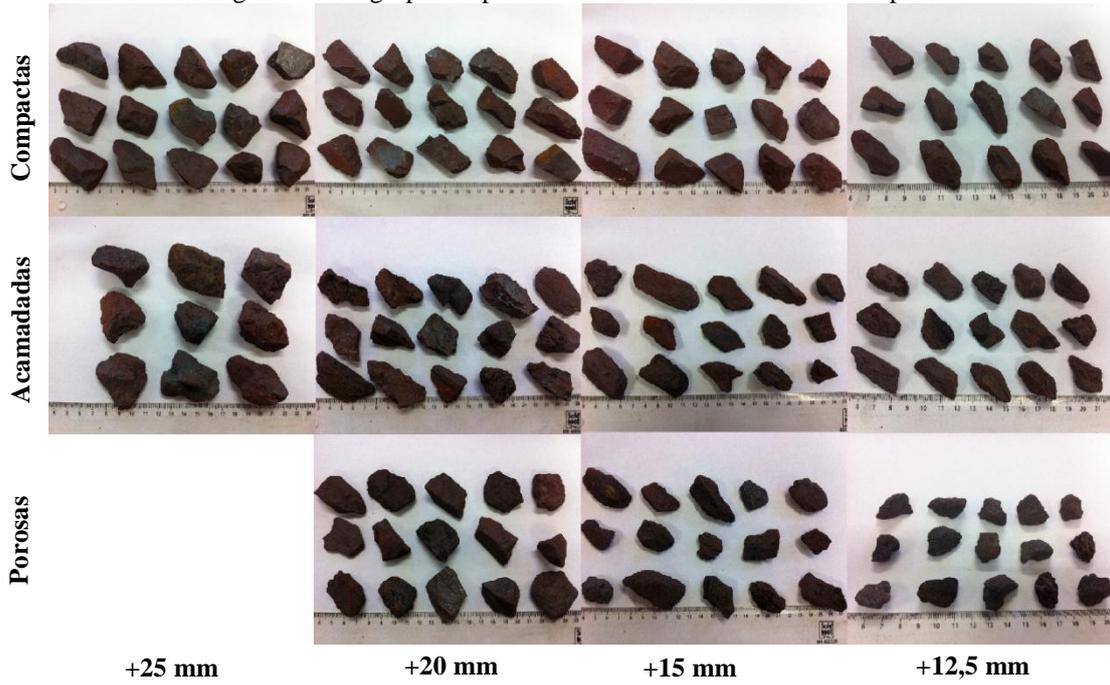


Figura 15: Subgrupos de partículas destinadas aos Testes de Impacto

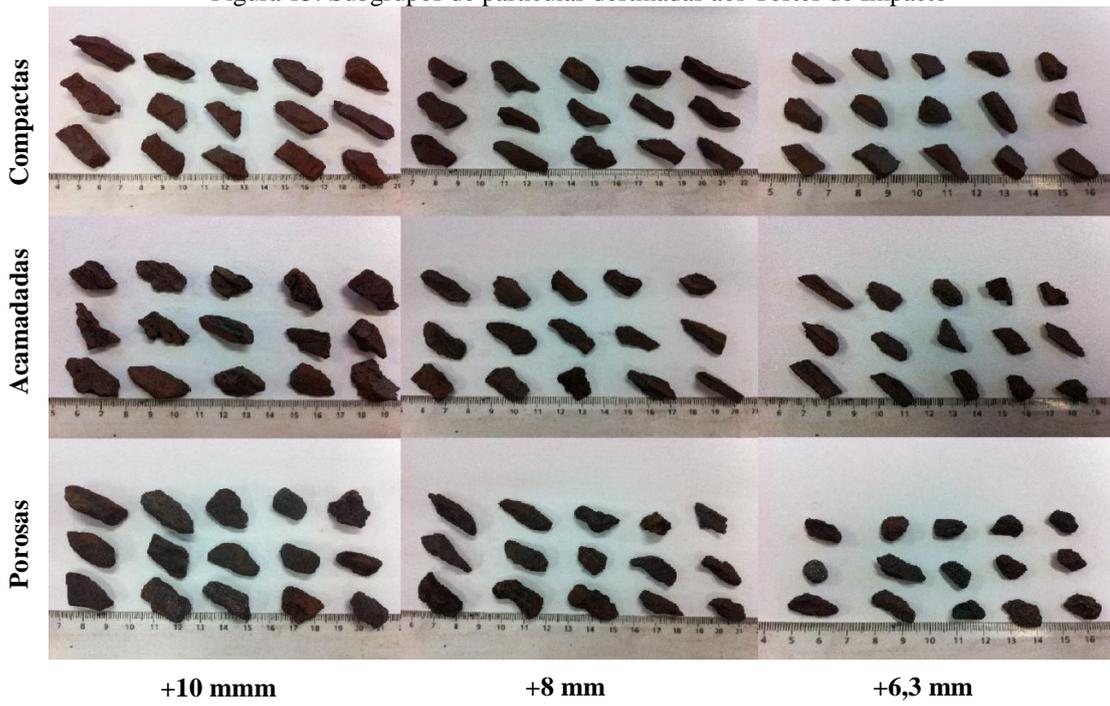


Figura 16: Subgrupos de partículas após Testes de Impacto

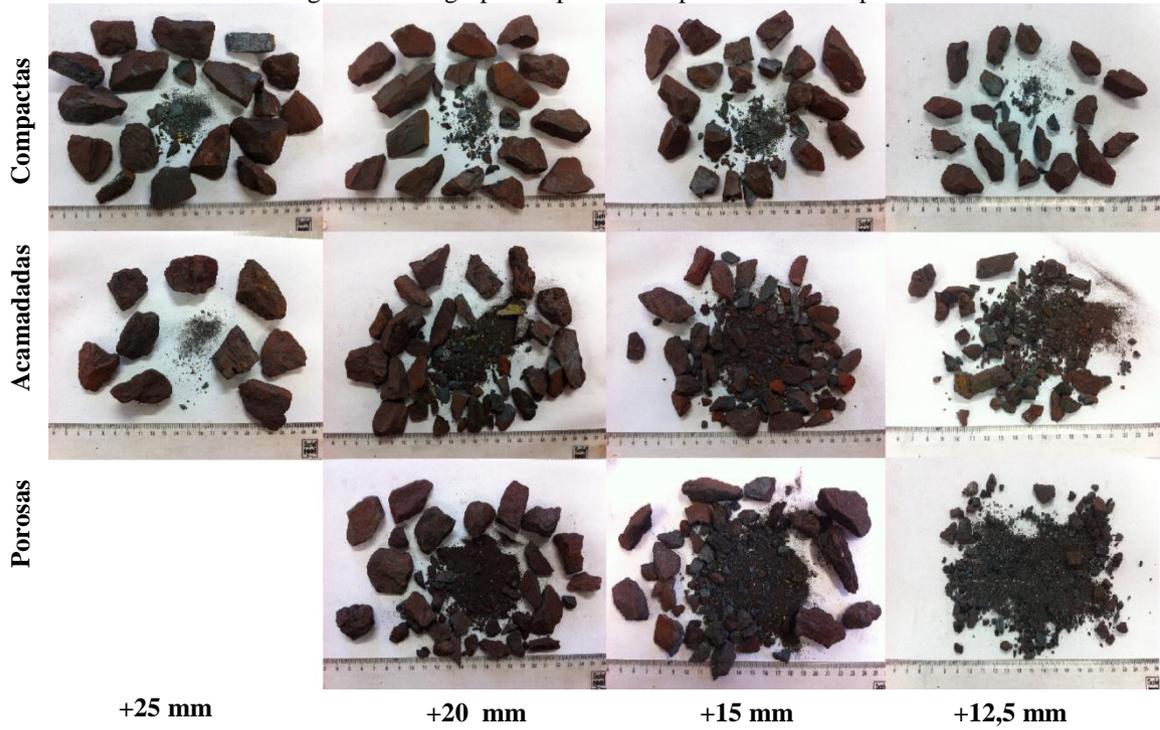
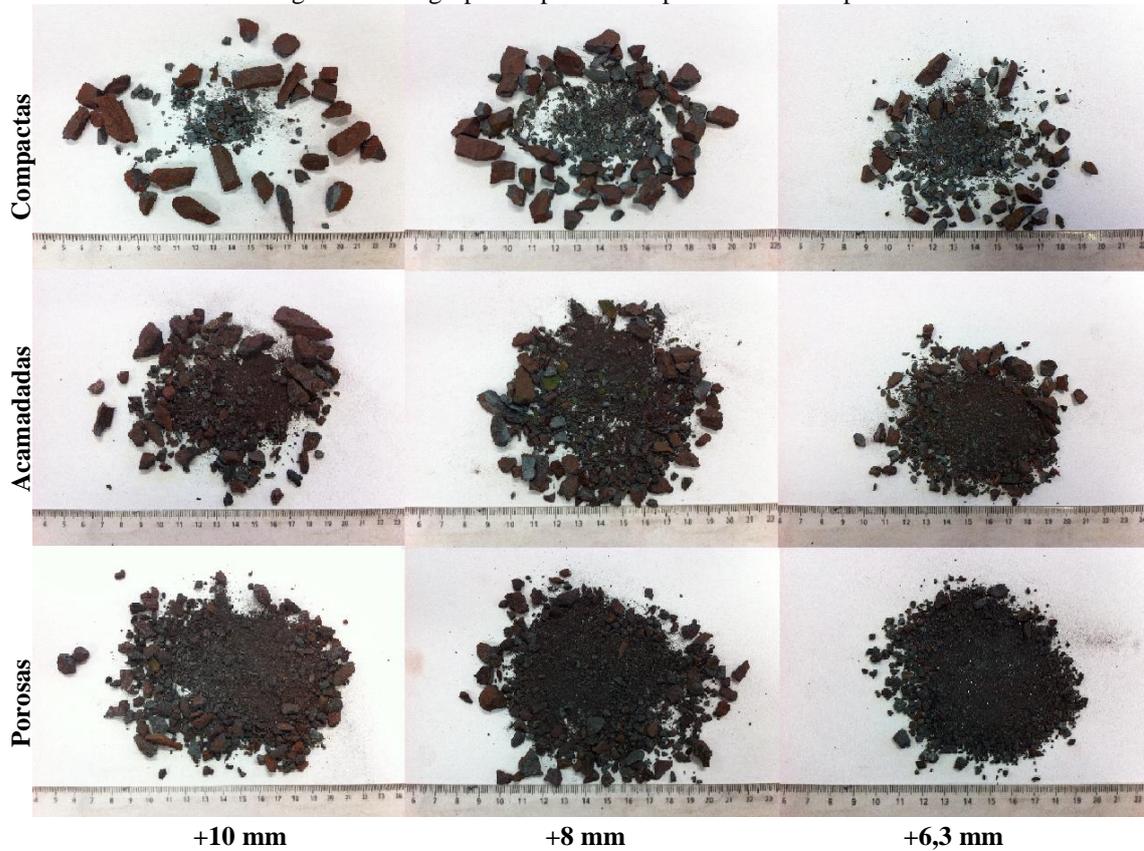


Figura 17: Subgrupos de partículas após Testes de Impacto



Como pode ser visto pelas imagens, os resultados visuais já confirmam a ideia de que partículas grossas se apresentam mais resistentes ao impacto quando comparadas a partículas

de granulometria inferior, assim como a notória diferença de resultados entre diferentes tipologias dentro da mesma fração granulométrica.

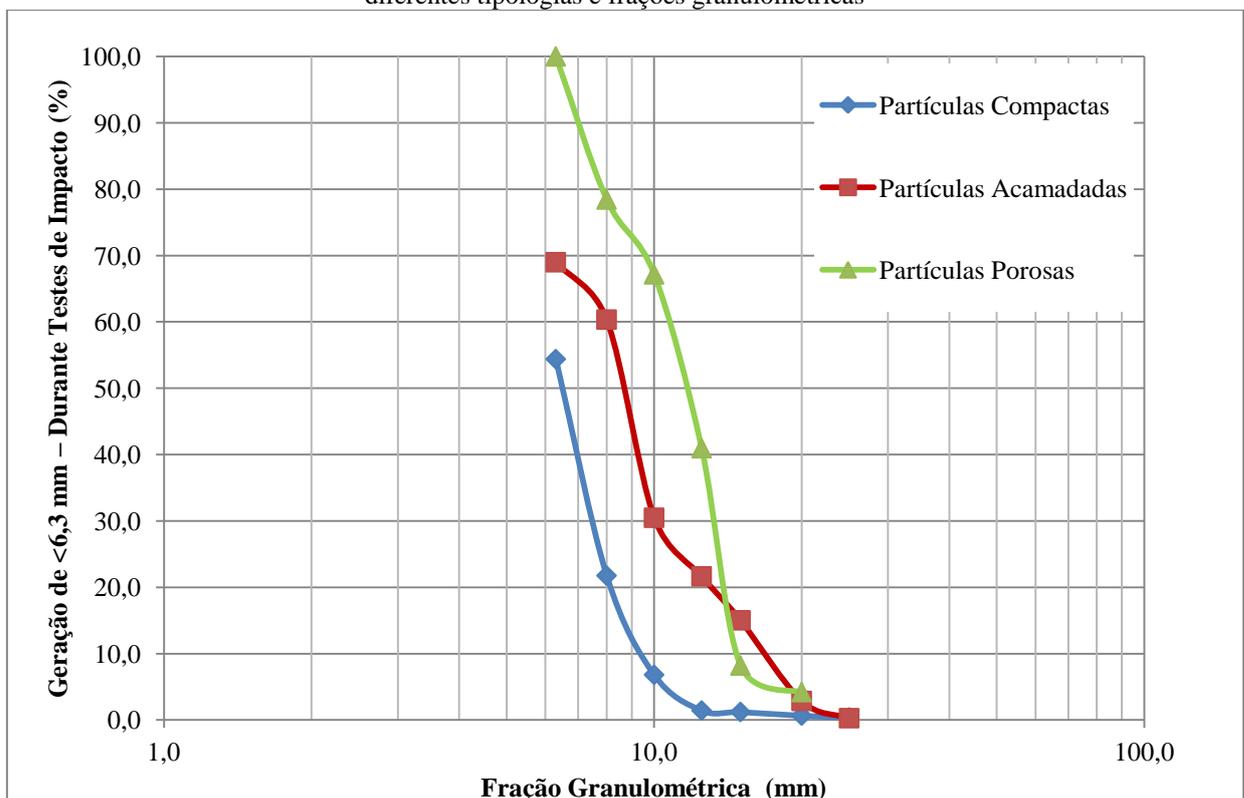
Neste caso, devido a sua baixa participação global na amostra, 1,2 %, o grupo de partículas classificado como “Outras” não foi submetido aos Testes de Impacto nesta fase de pesquisa.

A distribuição granulométrica de cada subgrupo após serem submetidos aos Teste de Impacto podem ser encontrados em Apêndice B. Focando as análises na geração de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm durante os testes, a Tabela 4 e Figura 18 foram criadas.

Tabela 4: Geração de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm durante Testes de Impacto, considerando diferentes tipologias e frações granulométricas

| Geração de <6,3 mm – Durante Testes de Impacto (%) | | | |
|--|----------------------|-----------------------|--------------------|
| Fração Granulométrica (mm) | Partículas Compactas | Partículas Acamadadas | Partículas Porosas |
| 25,0 | 0,4 | | 0,3 |
| 20,0 | 0,6 | 2,9 | 4,2 |
| 15,0 | 1,2 | 15,0 | 8,2 |
| 12,5 | 1,4 | 21,6 | 40,9 |
| 10,0 | 6,8 | 30,5 | 67,1 |
| 8,0 | 21,7 | 60,3 | 78,4 |
| 6,3 | 54,4 | 69,0 | 100,0 |

Figura 18: Geração de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm durante Testes de Impacto, considerando diferentes tipologias e frações granulométricas



Portanto, como pode ser visto pela Tabela 4 e Figura 18, a distribuição tipológica certamente desempenha um importante papel nos efeitos do manuseio, onde partículas porosas são as principais geradoras de finos, seguidas pelas partículas acamadadas. Partículas compactas de granulometria acima de 10 mm resistem bem ao impacto e geração de finos. Consequentemente, minimizar a participação de frações granulométricas abaixo de 10 mm durante a produção do granulado em questão é aconselhável e deve se tornar regra durante a seleção de parâmetros operacionais e arranjos de britagem.

Tais observações são condizentes com aquelas encontradas por Weedon and Wilson (2000) em seus estudos sobre minério de ferro e Sahoo, Weedon e Roach (2004b) em seus estudos sobre a degradação granulométrica de amostras de carvão, que submetendo amostras à testes de impacto utilizando aparelho de pêndulo duplo, observaram que com a diminuição do tamanho das partícula analisadas havia um aumento na geração de finos durante os testes.

Além disso, analisando os comportamentos dos subgrupos de partículas quando submetidos ao Teste de Impacto e correlacionando os mesmos ao comportamento das amostras durante os Testes de Queda e Tamboramento, é possível comparar a atuação da esfera de aço utilizada nos testes à forma com que as partículas de granulometrias grossas e tipologia compacta atuam sobre as demais durante o processo de manuseio. Sendo então possível observar a ocorrência de um efeito semelhante à moagem autógena durante tal processo, mesmo que de forma mais amena, onde partículas de granulometrias mais grossas e tipologia compacta degradam – cominuem – preferencialmente partículas de granulometrias inferiores e tipologias “não compactas”. Portanto, é aconselhável que estudos futuros analisem o processo de manuseio em questão sob a ótica dos moinhos autógenos, possivelmente adaptando as fórmulas e parâmetros dos mesmos para um completo conhecimento dos mecanismos de degradação presentes. Assim, tais estudos possuem a capacidade de apresentar como resultado características granulométricas e tipológicas ótimas que possibilitem a redução dos efeitos da degradação do material durante processos de manuseio.

5.5 SIMULAÇÕES DOS EFEITOS DO MANUSEIO

As Simulações dos Efeitos do Manuseio tornaram possíveis as análises das diferenças de resultados baseadas em mudanças da distribuição granulométrica do material, assim como mudanças em sua tipologia. Dessa forma, prevendo o comportamento do material durante o manuseio, as simulações indicam a porcentagem final de partículas em cada fração granulométrica, utilizando resultados provenientes dos Testes de Impacto, através da seguinte fórmula.

$$\text{Porcentagem Final} - (\text{Fração})_i = \sum_{n=1}^{20} [\text{Porcentagem Final da } (\text{Fração})_i \text{ no Subgrupo}_n, \text{ como resultado do Teste de Impacto}] \times [\text{Porcentagem do Subgrupo}_n \text{ na amostra inicial}]$$

Como pode ser entendido pela fórmula, considerando que cada subgrupo de partículas, ao se desintegrar devido aos efeitos de manuseio, gera outras partículas em uma variedade de frações granulométricas, a quantidade final global de partículas em cada fração granulométrica será a soma das quantidades geradas naquela dada fração por cada subgrupo analisado. Neste caso, como já mencionado e como resultado da Análise Tipológica, subgrupos são compostos por partículas de mesma tipologia e pertencentes a mesma fração granulométrica. Dessa forma, 20 subgrupos foram considerados e suas representatividades foram obtidas multiplicando a porcentagem de cada tipologia presente em uma determinada fração granulométrica pela porcentagem de tal fração na amostra global.

Portanto, como resultado da simulação, a porcentagem final resultante em cada fração granulométrica desejada é obtida pela soma das porcentagens de tal fração contidas nos subgrupos, previamente multiplicada pela porcentagem de tais subgrupos em relação à amostra global, como demonstrado pela fórmula.

Além disso, em amostras contendo uma determinada porcentagem inicial de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm, tal porcentagem será adicionada à quantidade de partículas em tal fração gerada por cada subgrupo.

Os gráficos a seguir, Figuras 19, 20, 21 e 22, apresentam comparações entre simulações, criadas com base na fórmula previamente descrita, e amostras submetidas ao Teste de Queda,

considerando diferentes tratamentos térmicos e distintas distribuições granulométrica iniciais. Para a execução das simulações, as distribuições tipológicas das amostras foram consideradas como sendo idênticas àquela encontrada durante a Análise Tipológica.

Figura 19: Comparação entre resultados provenientes do Teste de Queda e da Simulação dos Efeitos do Manuseio, considerando as amostras "Naturais – Com presença de finos"

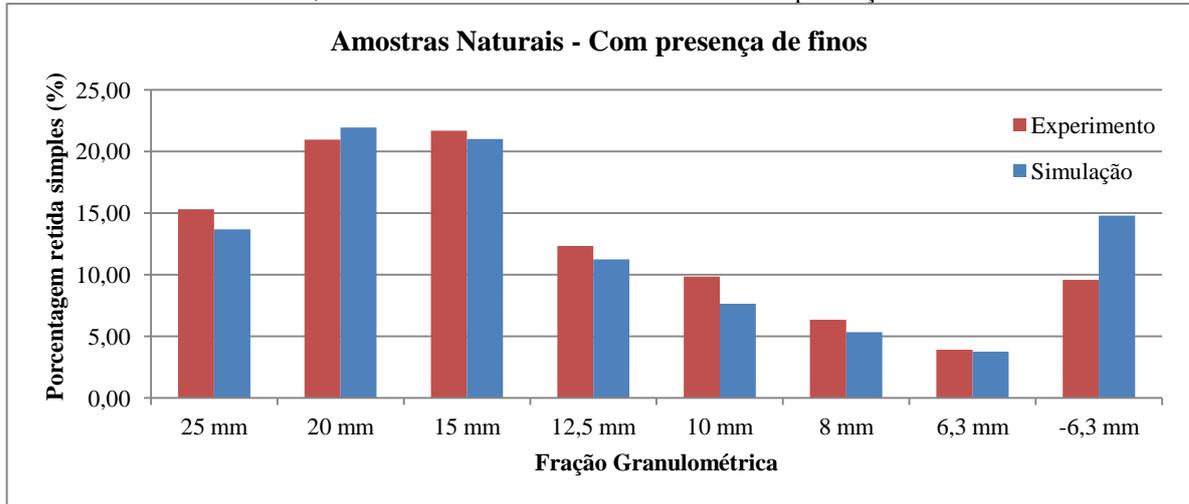


Figura 20: Comparação entre resultados provenientes do Teste de Queda e da Simulação dos Efeitos do Manuseio, considerando as amostras "Naturais - Grossas"

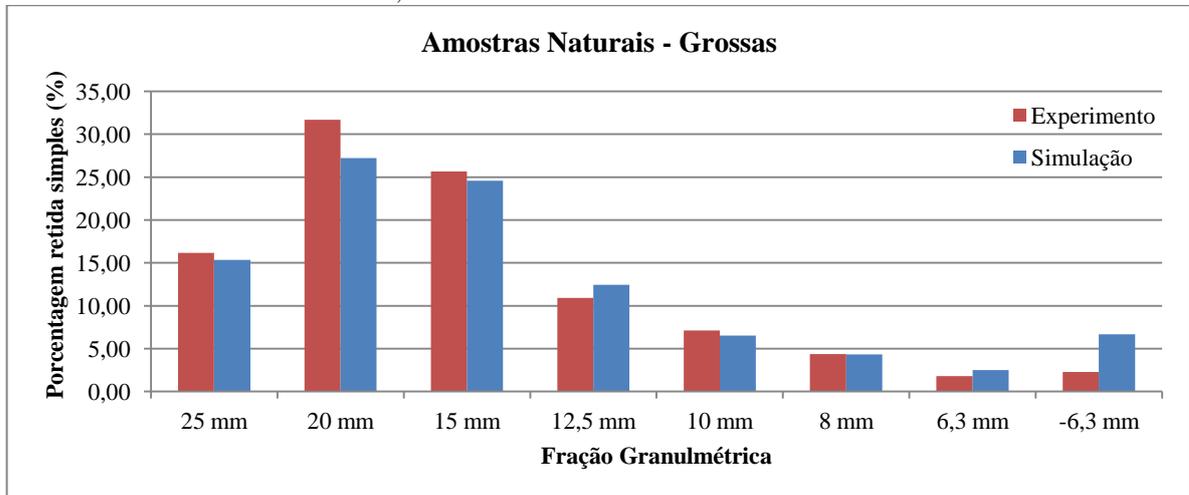


Figura 21: Comparação entre resultados provenientes do Teste de Queda e da Simulação dos Efeitos do Manuseio, considerando as amostras “Termicamente Tratadas – 5 Ciclos – Úmidas – Com presença de finos”

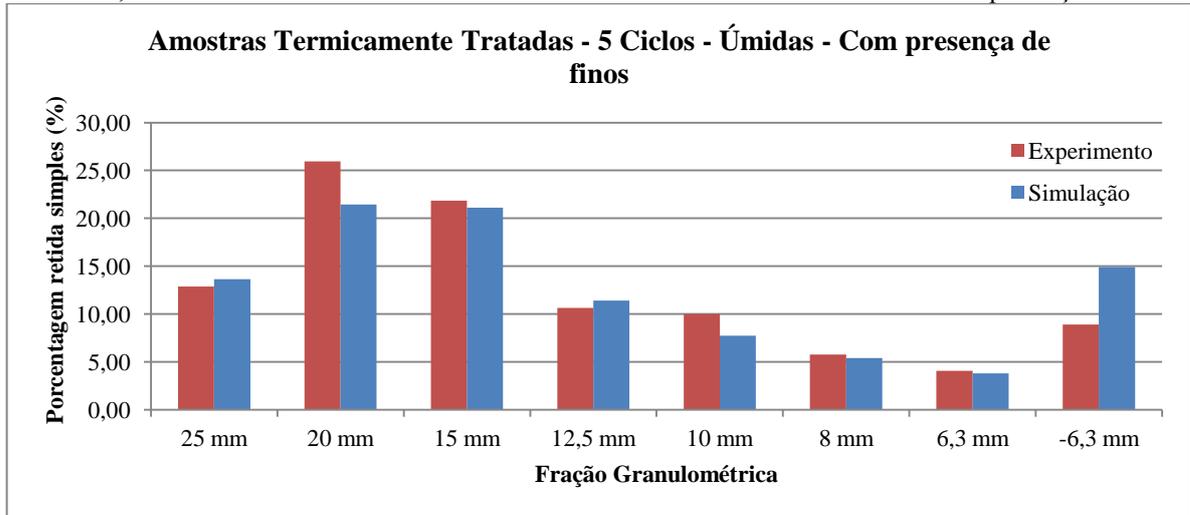
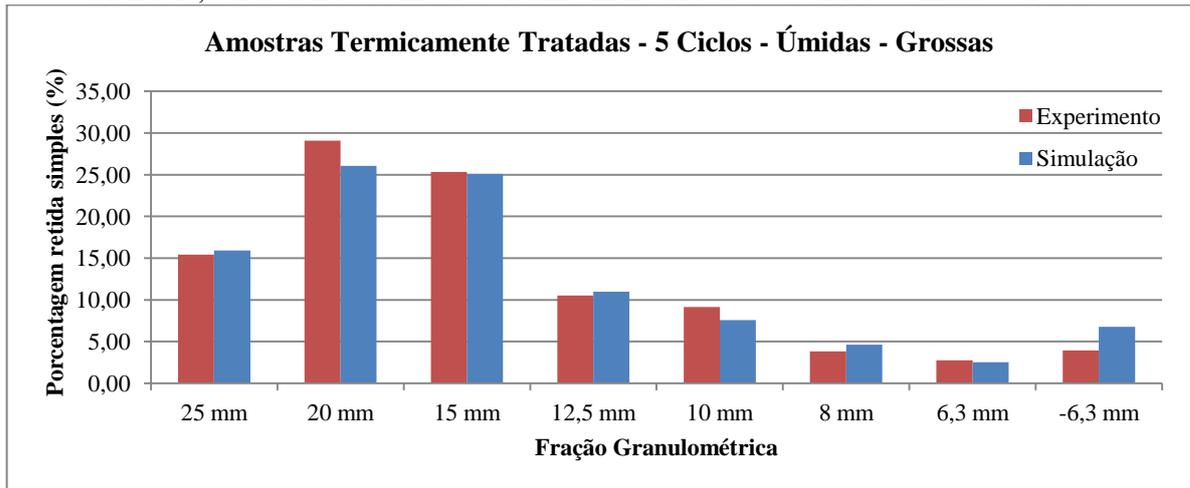


Figura 22: Comparação entre resultados provenientes do Teste de Queda e da Simulação dos Efeitos do Manuseio, considerando as amostras “Termicamente Tratadas – 5 Ciclos – Úmidas – Grossas”



Apesar dos atuais estudos ainda não possuírem todas as informações necessárias para criar uma simulação capaz de prever os efeitos do manuseio com exatidão, é possível afirmar que o comportamento observado durante os Testes de Impacto são correspondentes àqueles durante os Testes de Queda, uma vez que pelos gráficos anteriores pode ser vista uma determinada aderência entre os resultados dos experimentos e simulações.

Comparando as Figuras 19 e 20, onde ambas apresentam amostras à temperatura ambiente, e Figuras 21 e 22, onde ambas foram submetidas a 5 ciclos sucessivos de um tratamento térmico constituído por 3 dias a -32°C e 3 horas a 105°C , é possível observar que, independente de diferenças entre tratamentos térmicos e distribuições granulométricas iniciais, as simulações apresentaram performances consistentes.

Neste caso, a criação de tal simulação demonstra a coerência entre o comportamento das partículas de forma individual, Testes de Impacto, e o comportamento das partículas como grupo, Testes de Queda. Portanto, as influências das distribuições granulométricas e tipologia foram não só validadas por meio de tais simulações, como também medidas.

Os erros encontrados entre as simulações e os resultados dos Testes de Queda são creditados ao fato de que partículas mais grossas produziram uma maior quantidade de finos durante os Testes de Impacto do que produziriam durante Testes de Queda. Além disso, devido ao tamanho reduzido das amostras analisadas, não é possível afirmar que as mesmas possuam distribuições tipológicas iguais àquela considerada padrão e utilizada nas simulações. Outro fator muito importante é o chamado efeito de amortecimento, promovido pelos finos sobre partículas grossas.

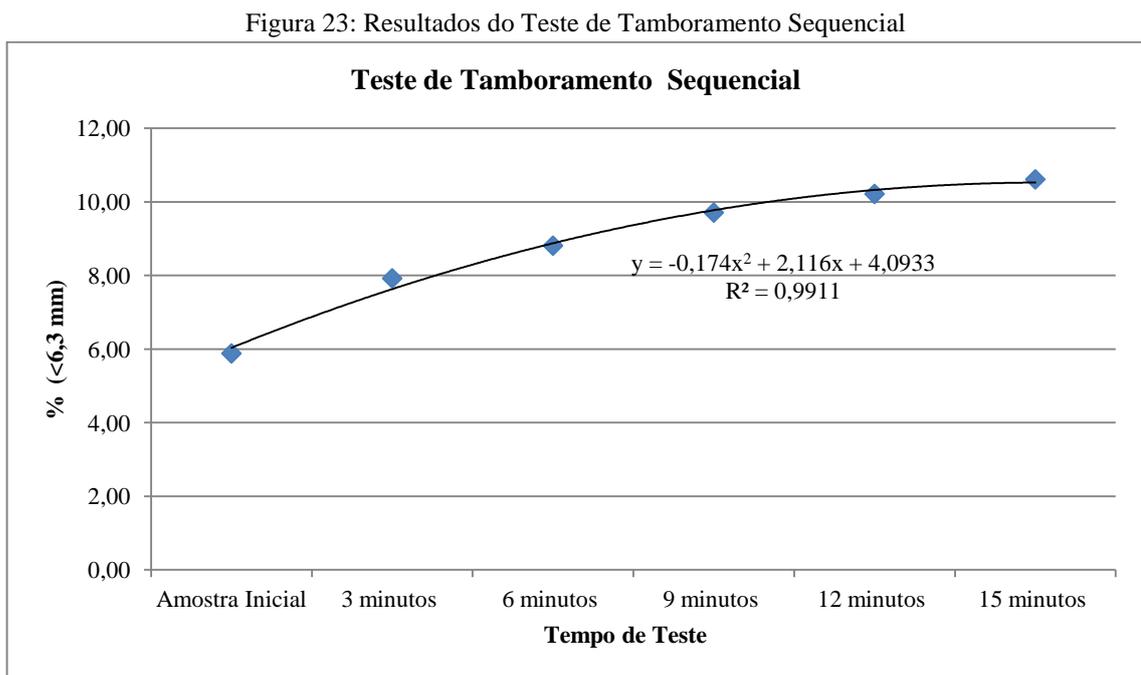
Autores como Fagerberg e Sandberg (1973), Waters, Vince e Mahoney (1989), Sahoo, Weedon e Roach (2004a) e Sahoo e Roach (2005b) observaram em seus estudos as consequências positivas do efeito de amortecimento durante processos de manuseio de materiais granulados. Segundo os autores, tal efeito resulta em uma menor taxa de geração de finos a cada queda, uma vez que os finos atuam de forma a amortizar o choque entre partículas grossas, assim como o choque de tais partículas contra o chão, reduzindo seus índices de degradação. Neste caso, como a fórmula utilizada nas simulações ainda não prevê tal efeito, o mesmo age como fonte de erro sobre os resultados.

Após o desenvolvimento da fórmula exposta no presente trabalho, foi verificado, por meio de revisões bibliográficas, que autores como Norgate, Tompsitt e Batterham (1986), Teo, Waters e Nicol (1990), Weedon e Wilson (2000), Sahoo, Weedon e Roach (2004a), Sahoo e Roach (2005a), Sahoo (2007) e Tavares e Carvalho (2012) já haviam se aventurado no desenvolvimento de formulismos, buscando prever o comportamento de materiais granulados durante condições de manuseio. Dentre os trabalhos de tais autores, além dos fatores envolvidos na presente fórmula, a superfície de impacto, efeito de amortecimento e estabilização também foram consideradas. Dessa forma, durante estudos futuros para o aperfeiçoamento da atual fórmula, altamente recomendados, é indicado também a consideração dos fatores previamente descritos.

Acredita-se que, quando aprimoradas, as simulações serão não apenas capazes de indicar com exatidão os efeitos da degradação, mas também determinar as condições ideais de distribuição granulométrica e tipológica em que o material estudado apresente a mínima degradação ao longo dos processos de manuseio.

5.6 TESTE DE TAMBORAMENTO SEQUENCIAL

Através dos resultados das análises das distribuições granulométricas realizadas após cada ciclo de Teste de Tamboramento, com duração de 3 minutos, o seguinte gráfico foi obtido, Figura 23.



Como pode ser visto pela Figura 23, após cerca de 12 minutos, compostos por 4 ciclos de 3 minutos, não há mais mudanças significativas na porcentagem de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm, indicando um ponto de equilíbrio das condições granulométricas da amostra. Tais resultados comprovam os conceitos apresentados por Teo, Waters e Nicol (1990) e Sahoo e Roach (2005c), que propõem que os maiores índices de degradação do material durante os primeiros estágios de manuseio estão relacionados às fraturas intrínsecas às partículas devido aos estresses mecânicos aos quais as mesmas foram submetidas durante

processos anteriores. Assim, após o “alívio” de tal tensão, as partículas continuam passíveis de fraturas volumétricas e superficiais, porém a degradação das mesmas passa a ocorrer em uma menor intensidade. Os autores também apontaram o efeito de amortecimento como um dos fatores associados à redução da taxa de aumento de finos durante Testes de Tamboramento.

5.7 TESTE DE QUEDA SEQUENCIAL

Como os Testes de Queda Sequencial aconteceram utilizando três amostras, os seguintes gráficos são baseados nos resultados médios das mesmas, Figuras 24 e 25.

Figura 24: Relação entre a distribuição granulométrica das amostras e o número de quedas às quais as mesmas foram submetidas durante o Teste de Queda Sequencial

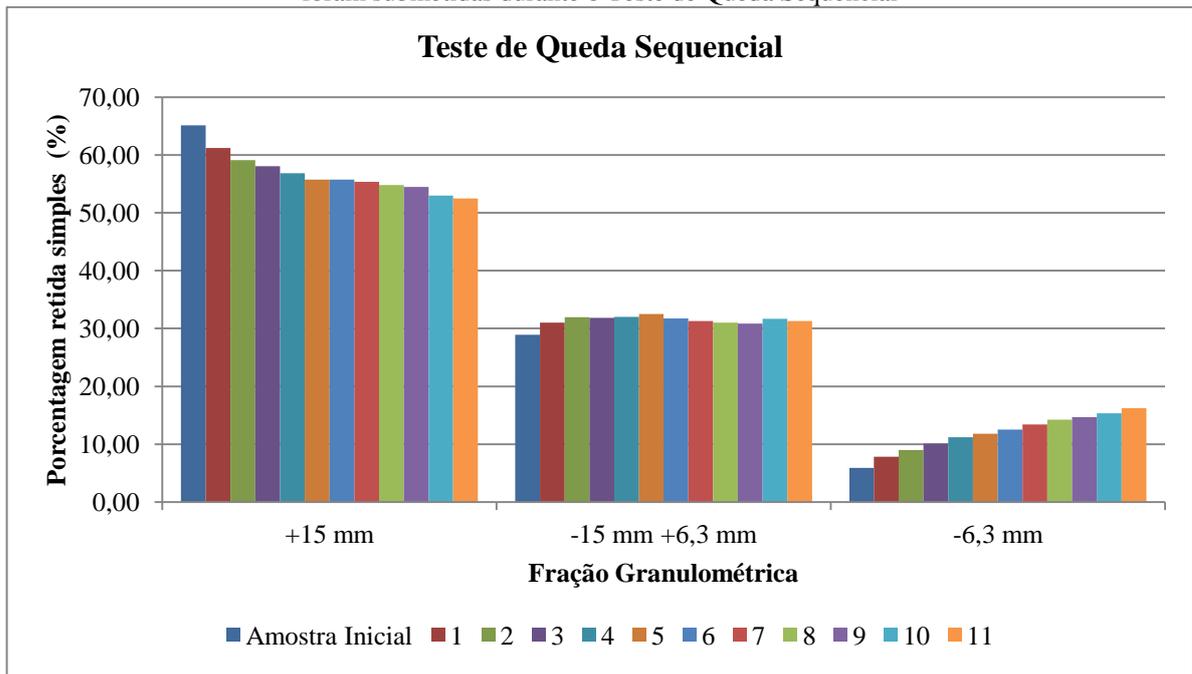
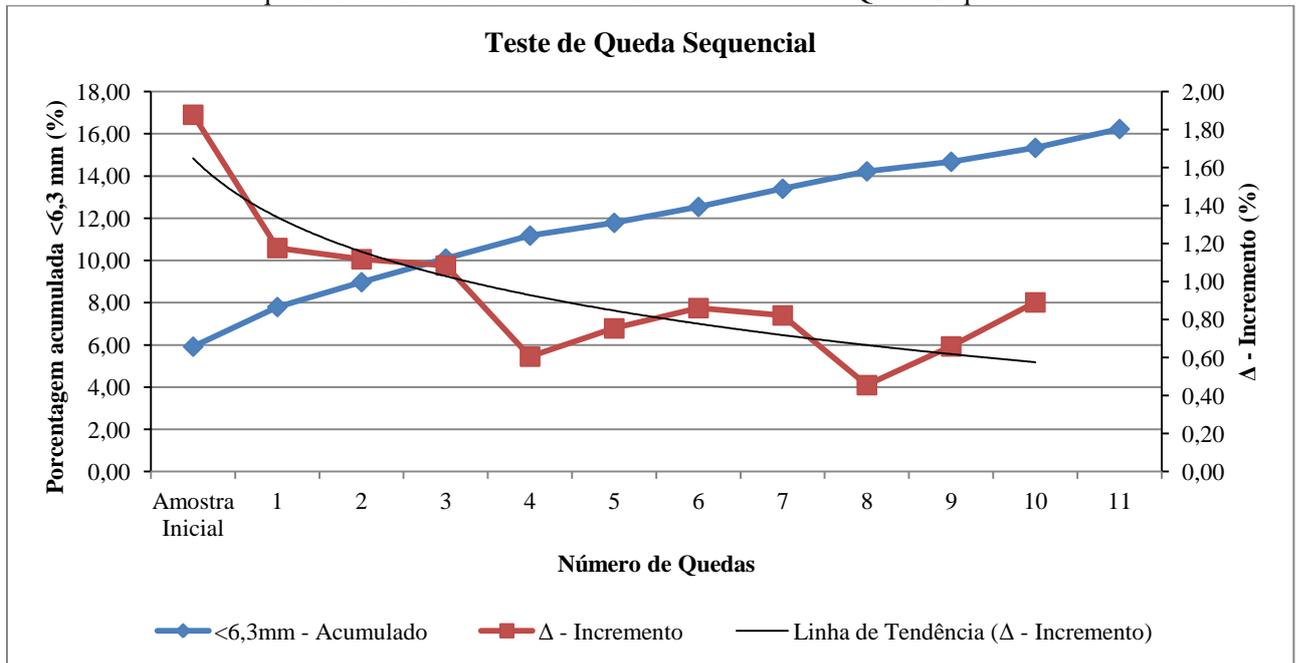


Figura 25: Relação entre a geração de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm e o número de quedas às quais as amostras foram submetidas durante o Teste de Queda Sequencial



De acordo com a Figura 24, há uma significativa degradação das partículas grossas (+ 15 mm) durante as primeiras quedas, havendo uma migração mais acelerada entre frações granulométricas até a quinta queda. Pelo mesmo gráfico, é possível observar que partículas de granulometria intermediária (-15 + 6,3 mm) apresentam variações reduzidas, quando comparadas aos demais grupos, partículas finas e grossas.

A Figura 25 apresenta a relação entre a geração de finos e o número de quedas às quais amostras foram submetidas durante o Teste de Queda Sequencial. Em tal gráfico, também está presente o termo "Δ – Incremento", que atua como a diferença entre a porcentagem de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm das amostras após um determinado número de quedas e a condição imediatamente anterior ao número em questão. Seguindo este conceito, é possível observar uma maior geração de partículas de tal granulometria durante as quedas iniciais, alcançando um pico de 1,8 % de incremento durante a primeira queda. Além disso, como demonstrado pela Figura 24, há um permanente aumento da porcentagem de finos durante as quedas seguintes, onde, após 11 quedas, a porcentagem de partículas abaixo 6,3 mm alcança 16,23 %, o que representa um incremento de 0,89 % em relação à condição anterior, Figura 25.

Dessa forma, apesar de tais incrementos continuarem apresentando valores relativamente altos, pela Figura 25 é possível observar que a "Linha de Tendência (Δ – Incremento)" está próxima à um nível de estabilização. Portanto, tal estabilização do valor de incrementos sobre a quantidade de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm durante quedas é considerada como sendo próxima à queda de número 11. Além disso, acredita-se que, embora os valores de " Δ – Incremento" estejam relativamente próximos aos da "Linha de Tendência", os resultados seriam ainda mais assertivos casos as amostras utilizadas seguissem os tamanhos considerados representativos.

Visando um melhor entendimento do comportamento das amostras durante os Testes de Queda Sequencial, assim como uma validação das Simulações dos Efeitos do Manuseio, os resultados oriundos dos testes foram comparados àqueles obtidos pelas simulações. Tais comparações foram baseadas em resultados de agrupamentos – estágios – de duas quedas cada, como pode ser visto pelos gráficos a seguir, Figuras 26, 27 e 28.

Figura 26: Comparação entre resultados provenientes do Teste de Queda Sequencial e da Simulação dos Efeitos do Manuseio – Estágio 1

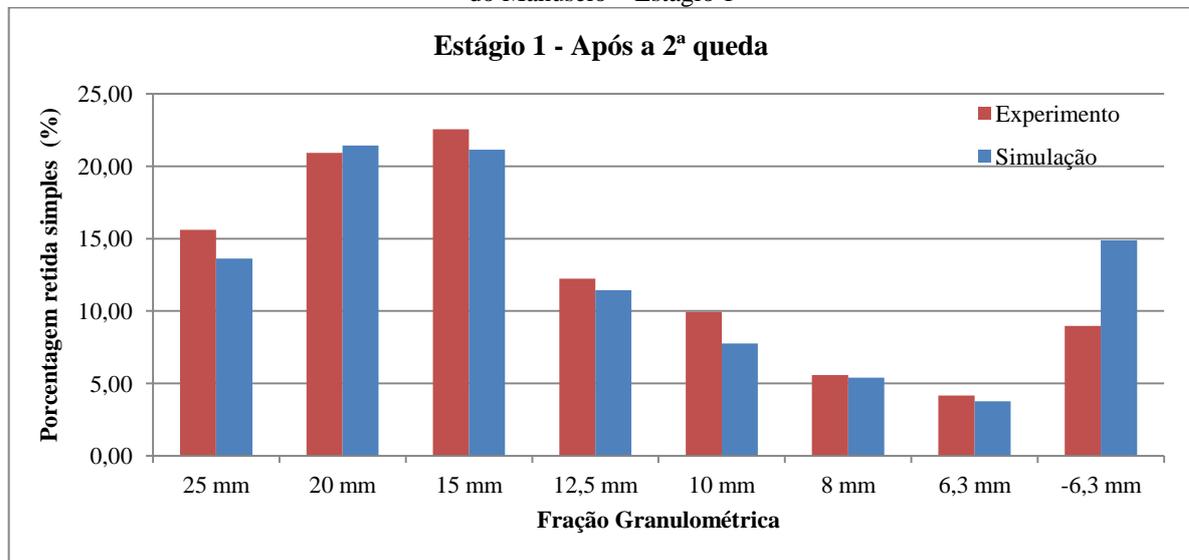


Figura 27: Comparação entre resultados provenientes do Teste de Queda Sequencial e da Simulação dos Efeitos do Manuseio – Estágio 2

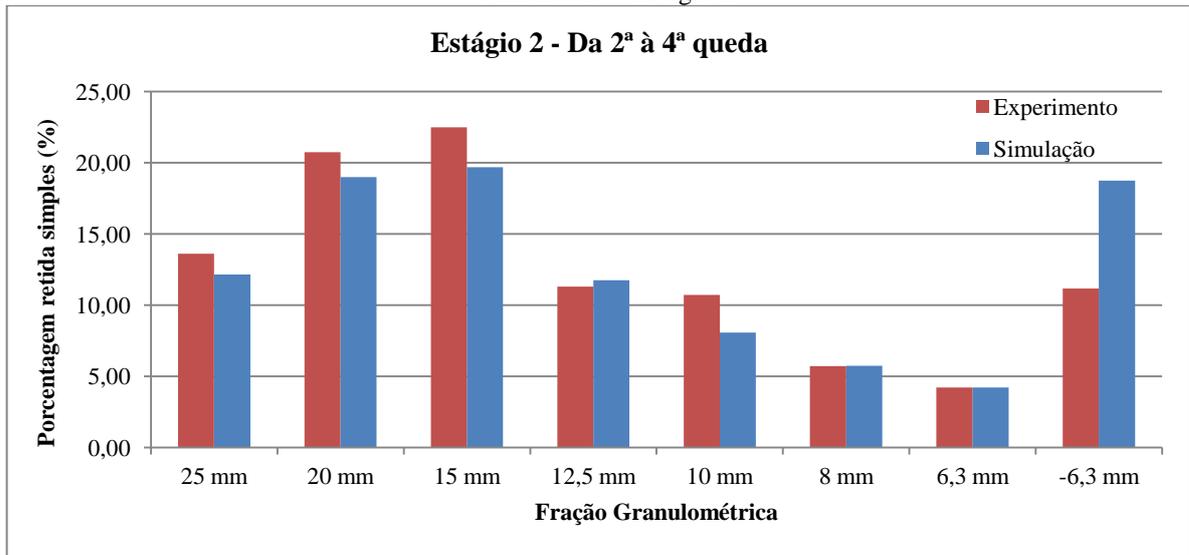
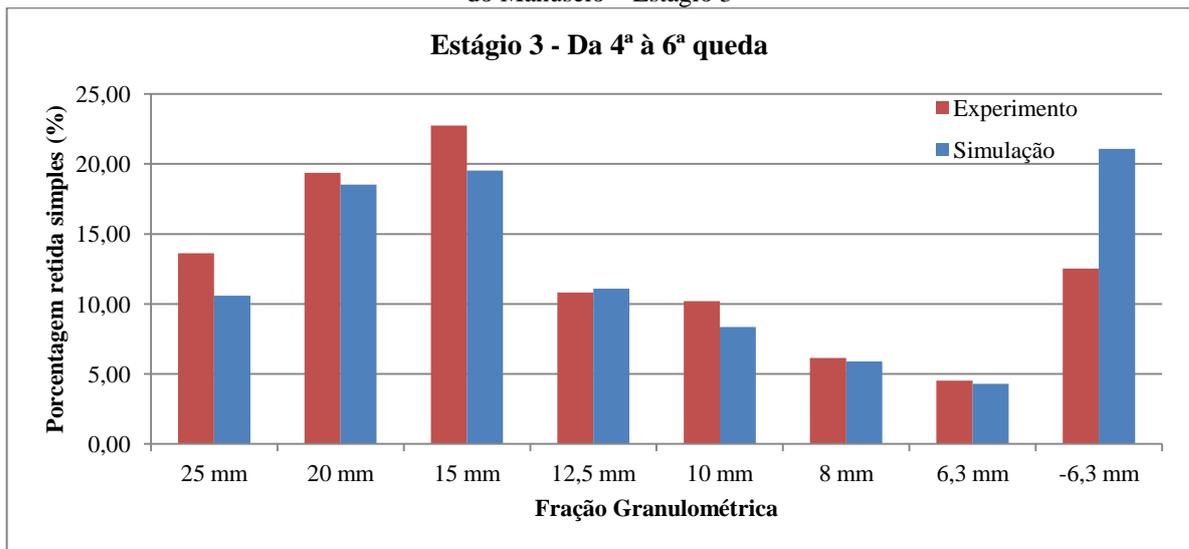


Figura 28: Comparação entre resultados provenientes do Teste de Queda Sequencial e da Simulação dos Efeitos do Manuseio – Estágio 3



Como demonstrado pelas Figuras 26, 27 e 28, as simulações também são capazes de prever, o comportamento das amostras durante os Testes de Queda Sequencial. Porém, como pode ser visto, os resultados das mesmas se apresentam mais assertivos quando comparados aos primeiros estágios de quedas, onde, com o aumento do número de quedas, ocorre um aumento da diferença entre os resultados dos testes e as simulações. Neste caso, um dos fatores associados a tal diferença entre experimentos e simulações se refere ao fato de haver uma diminuição do percentual das tipologias “não compactas” presentes nas frações mais grossas ao longo das quedas, uma vez que as mesmas são mais friáveis, alterando assim a distribuição tipológica das amostras durante a sequência de testes. Sendo tais mudanças não consideradas

nas atuais configurações do simulador, o mesmo tem sua assertividade decrescida. Dessa forma, é então aconselhado a inclusão das gradativas mudanças tipológicas em trabalhos futuros de aperfeiçoamento das simulações.

Além disso, como ao longo das quedas há um aumento no percentual de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm nas amostras, o já descrito efeito de amortecimento tem sua influência aumentada, atuando de forma a reduzir a geração de finos a cada queda, assim como a assertividade das simulações. Autores como Fagerberg e Sandberg (1973), Waters, Vince e Mahoney (1989), Sahoo, Weedon e Roach (2004a) e Sahoo e Roach (2005b) já haviam comprovado a influência de tal fator em Testes de Queda.

Como também mencionado no Teste de Tamboramento Sequencial e de acordo com Teo, Waters e Nicol (1990) e Sahoo e Roach (2005c), nos primeiros estágios dos processos de manuseio, há um “alívio” do estresse mecânico contido principalmente nas partículas grossas, devido aos processos anteriores aos quais o material foi submetido, causando maiores taxas de degradação. Portanto, após tal “alívio”, os índices de degradação das partículas serão reduzidos, levando a uma relativa estabilização do material ao longo dos processos de manuseio.

Paralelamente a tal efeito, a indesejada diminuição da quantidade de partículas de granulometria grossa ao longo das quedas acarreta uma consequente redução na taxa de geração de finos durante as mesmas. Tal processo ocorre devido ao fato de que as frações granulométricas superiores atuam de forma análoga a “corpos moedores” sobre partículas de granulometria intermediária (-15 +6,3 mm), como demonstrado pelos Testes de Impacto, intensificando a degradação das mesmas. Logo, a redução do percentual de partículas de granulometria grossa leva a uma diminuição na geração de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm durante o processo de manuseio.

Pode também ser observado que, de maneira geral, apesar de ser comumente pensado que a abrasão promove uma maior formação de finos, quando comparada ao impacto, os presentes estudos demonstram uma tendência oposta. Pelos resultados dos Testes de Queda e Testes de Tamboramento, torna-se claro que, no caso do material em questão, o impacto é o maior contribuinte para a formação de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm, uma vez que

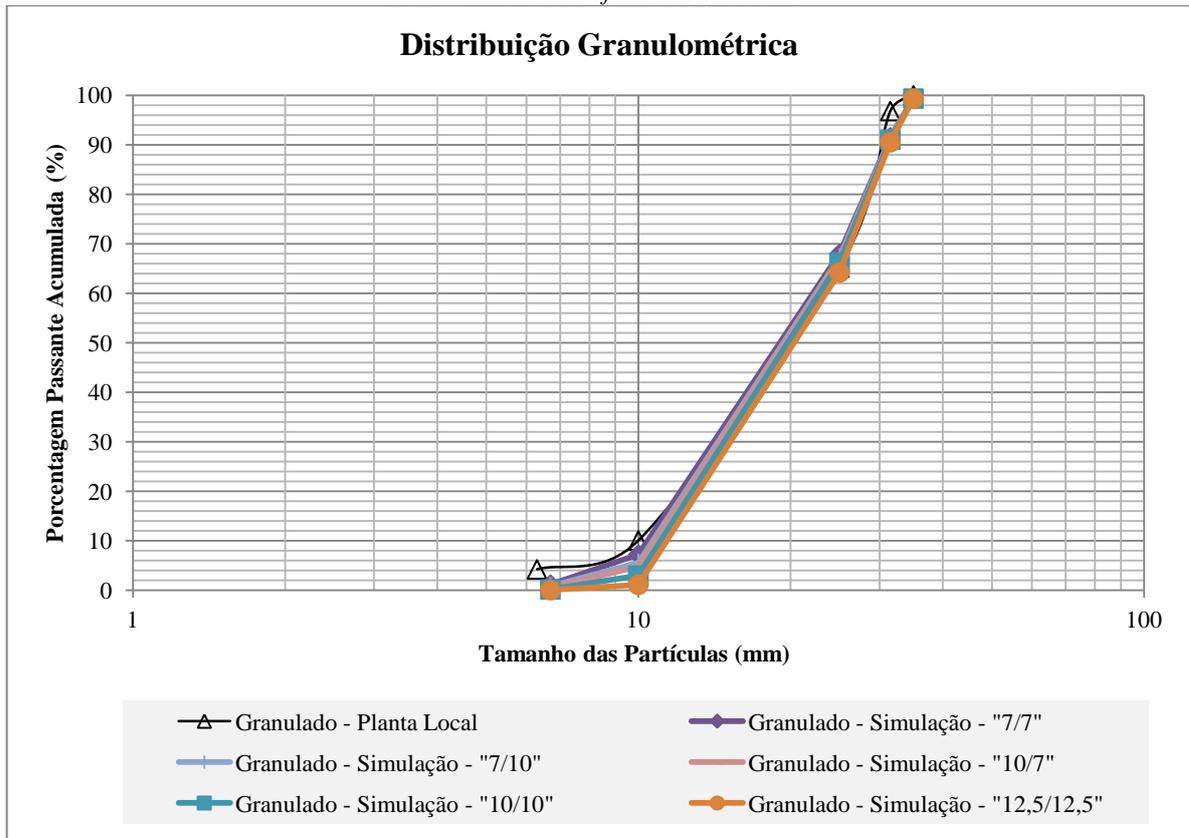
tal formação ocorre com maiores taxas durante Testes de Queda e que os mesmos estão mais bem relacionados aos Testes de Impacto.

5.8 SIMULAÇÕES – USIM PAC[®]

O *software* USIM PAC[®] foi usado visando a reprodução da planta de beneficiamento local, com o principal objetivo de simular mudanças nas aberturas das peneiras o último *deck* do peneiramento primário e secundário.

Dessa forma, simulações utilizando parâmetros conhecidos dos equipamentos na planta foram executadas variando os parâmetros desconhecidos até se obter uma condição “padrão”, em que os resultados da simulação se equivalessem o máximo possível com aqueles obtidos pela planta, levando-se em conta a distribuição granulométrica dos produtos, granulado e *sinter feed*, assim como o Split entre os mesmos. Neste caso, foram necessárias mais de 200 tentativas até que tal condição fosse estabelecida. Assim, baseando-se em tal condição “padrão”, modificações nas aberturas das peneiras foram simuladas, como pode ser visto pelo gráfico a seguir, Figura 29.

Figura 29: Distribuição granulométrica original do granulado estudado e de resultados obtidos por simulações feitas utilizando o *software* USIM PAC[®]



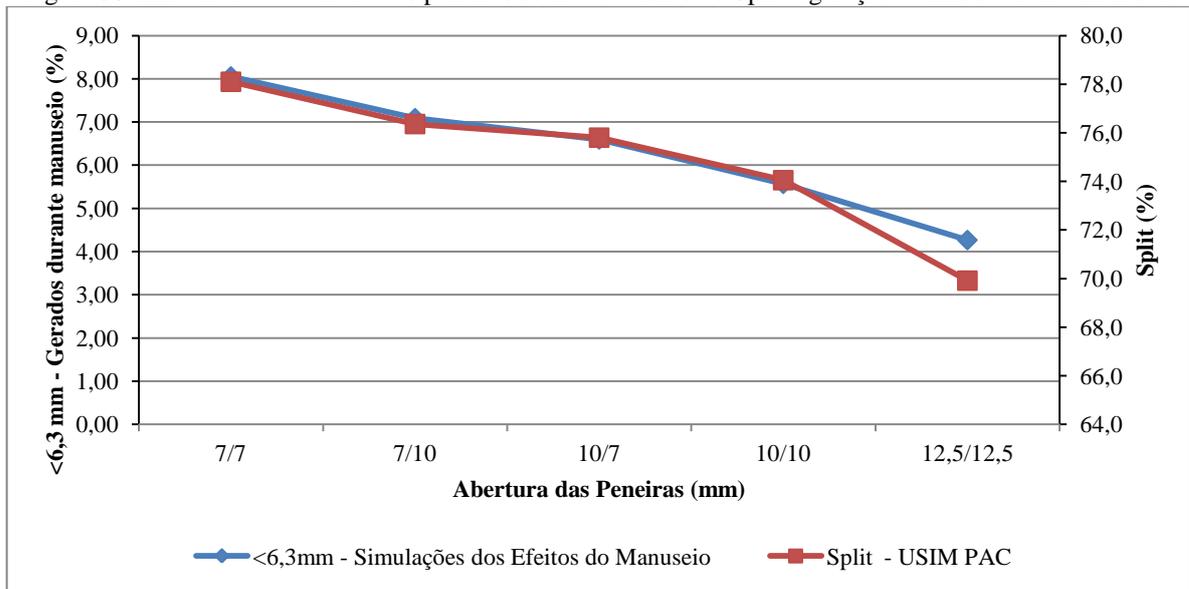
Neste caso, o termo usado “7/7” ilustra o resultado da simulação onde o peneiramento primário e secundário possuem as peneiras de seu segundo *deck* com abertura de 7 mm. Seguindo o mesmo conceito, o termo “10/7” ilustra o resultado da simulação em que o segundo *deck* do peneiramento primário possui uma abertura de 10 mm, enquanto o segundo *deck* do peneiramento secundário possui uma abertura de 7 mm.

Através da Figura 29, é possível observar, como esperado, que um aumento da abertura das peneiras leva a produção de um granulado de granulometria mais grossa. Neste caso, tal resultado também é observado mesmo quando apenas uma das peneiras tem sua abertura aumentada, como nas simulações “7/10” e “10/7”. Além disso, como também já esperado, um aumento da abertura de ambas as peneiras produz um granulado significativamente mais grosso quando comparado àqueles provenientes de simulações onde apenas uma das peneiras teve sua abertura de tela aumentada.

Baseando-se nos diferentes resultados fornecidos pelo USIM PAC[®], Simulações dos Efeitos do Manuseio foram também realizadas. Dessa forma, a previsão da formação de finos foi

analisada para cada cenário de abertura da tela das peneiras. Assim como a distribuição granulométrica, outro importante resultado proveniente do USIM PAC[®] é o Split, indicando a porcentagem da produção que se encontra como granulado, uma vez que o mesmo é objetivado por um maior valor de mercado quando comparado ao *sinter feed*. Assim, cruzando os dados fornecidos pelo USIM PAC[®] e pelas Simulações dos Efeitos do Manuseio, o seguinte gráfico foi obtido, Figura 30.

Figura 30: Influência da abertura das peneiras sobre os valores do Split e geração de finos durante manuseio



Como pode ser visto pela Figura 30, uma redução no valor do Split, indicando um abatimento na produção de granulado e causada pelo engrossamento do mesmo, promove um decréscimo proporcional na geração de finos devido ao manuseio. Porém, tal proporcionalidade é observada apenas até a configuração “10/10”, sendo que após tal ponto o Split tem seu valor reduzido a uma maior taxa que aquela apresentada pela redução da geração de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm.

Portanto, apesar de uma análise econômica ainda ser necessária, é possível afirmar que a mudança na abertura das telas do segundo *deck* dos peneiramentos primário e secundário dos atuais 7 mm para 10 mm é altamente recomendada, uma vez que, apesar do valor do Split sofrer uma redução, tal mudança impactaria significativamente na garantia de uma notória qualidade física do granulado em questão ao atingir seu destino final.

6 CONCLUSÕES

Como enfatizado durante o presente trabalho, é reconhecido que o mesmo não seguiu de maneira exata as normas e padrões vigentes, seja com relação ao tamanho das amostras utilizadas ou quanto a realização dos testes em si. Assim, demonstrando a compreensão da absoluta importância da representatividade das amostras e da padronização de testes, o presente trabalho está sendo considerado como “um estudo preliminar”, já indicando que estudos futuros visando a adequação do mesmo às normas e padrões são aconselháveis. Sendo que os mesmos não foram seguidos devido às necessidades imediatas dos estudos em questão, para que assim decisões rápidas pudessem ser tomadas, visando um aumento da qualidade do granulado estudado.

Porém, mesmo não atendendo tais normas, os resultados aqui apresentados ainda assim são considerados de sucesso, atendendo as necessidades imediatas da empresa, uma vez que permitiram a compreensão das tendências de comportamento do material durante condições de manuseio. Dessa forma, as seguintes conclusões podem ser tomadas:

- A distribuição granulométrica e tipológica do material possui primordial influência sobre seu comportamento durante o manuseio.
- Amostras “Congeladas - Úmidas – Com presença de finos” se mostraram substancialmente mais resistentes que amostras em demais condições. Acredita-se que tal resistência não esteja relacionada à temperatura em si, mas sim à “superfície de sacrifício” formada pelo gelo ao redor das partículas, assim como a aglomeração das mesmas, também devido ao gelo, permitindo que a amostra se comportasse então como um “bloco maciço/único” e não mais como partículas individuais.
- Com exceção da amostra acima, não há evidências de que as condições intempéricas testadas tenham apresentado influências sobre o comportamento do material durante manuseio.
- Estudos de abrasão, Testes de Tamboramento Sequencial, demonstraram que com 12 minutos de teste o material atinge um alto nível de degradação e que após tal ponto o aumento da degradação passa a não ser mais significativo.

- Como pode ser observado, para o material em questão, o impacto é o maior contribuinte para a formação de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm. Dessa forma, baseando-se em referências bibliográficas, quedas de alturas acima de 2 m devem ser evitadas ao longo dos processos de manuseio.
- Partículas porosas são as mais influentes na geração de finos, seguidas pelas partículas acamadadas. Partículas compactas de granulometria acima de 10 mm resistem bem ao impacto, gerando pequenas quantidades de finos durante o mesmo. Conseqüentemente, minimizar a participação de frações granulométricas abaixo de 10 mm durante a produção do granulado em questão é aconselhável e deve se tornar regra durante a seleção de parâmetros operacionais e arranjos de britagem.
- Apesar de uma análise econômica ainda ser necessária, é possível afirmar que uma mudança na abertura das telas do segundo *deck* dos peneiramentos primário e secundário dos atuais 7 mm para 10 mm é altamente recomendada, uma vez que, embora o valor do Split sofra uma redução, tal mudança impactaria significativamente na garantia de uma notória qualidade física do granulado ao atingir seu destino final.
- Uma campanha de amostragem deve ser feita na planta de beneficiamento local, visando conhecer as distribuições granulométricas antes e depois de cada interação do material com os equipamentos utilizados. Tal conhecimento é necessário não somente para entender o comportamento do minério em questão durante suas interações com os equipamentos, mas também para permitir futuras simulações precisas da operação.
- Um mapeamento das frentes de lavra, assim como de todo o corpo mineral, baseado na tipologia presente é aconselhável. Tal informação será de grande importância durante a blendagem do material, permitindo uma aumento da qualidade física e previsibilidade do produto final. Neste caso, também é proposto um estudo da viabilidade de utilizar as frentes de lavra com predominância de partículas porosas e acamadadas apenas para a produção de *sinter feed*, diminuindo assim a degradação do granulado ao longo dos processos de manuseio, uma vez que o mesmo passaria a ser composto predominantemente por partículas compactas, mais resistentes.
- A correlação entre o Teste de Impacto e os Testes de Queda e Tamboramento fez possível observar a ocorrência de um efeito semelhante à moagem autógena durante o processo de manuseio, mesmo que de forma menos intensa, onde partículas de granulometrias mais grossas e tipologia compacta degradam – cominuem – preferencialmente partículas de granulometrias inferiores e tipologias “não

compactas”. Portanto, sendo aconselhável que estudos futuros busquem o aperfeiçoamento da fórmula exibida no presente trabalho, indica-se também que durante os mesmos se analise o processo de manuseio em questão sob a ótica dos moinhos autógenos, possivelmente adaptando suas fórmulas e parâmetros, para um completo conhecimento dos mecanismos de degradação presentes. Dessa forma, quando aprimoradas, as simulações serão não apenas capazes de indicar com exatidão os efeitos da degradação, mas também determinar as condições ideais de distribuição granulométrica e tipológica em que o material estudado apresente a mínima degradação ao longo dos processos de manuseio.

- Como pode ser observado durante os Testes de Queda Sequencial, o aumento no percentual de partículas de granulometria abaixo de 6,3 mm nas amostras ao longo das quedas acarreta na ocorrência do chamado “efeito de amortecimento”, diminuindo os índices de degradação das partículas de granulometria superior. Tal efeito resulta em uma conseqüente menor taxa de geração de finos a cada queda, uma vez que o mesmo atua de forma a amortizar o choque entre partículas grossas, assim como o choque de tais partículas contra o chão, reduzindo assim sua degradação. Portanto, torna-se importante estudar a viabilidade de realizar um “peneiramento tardio”, onde a separação entre os produtos granulado e *sinter feed* ocorra com o material já no porto, permitindo assim que os finos presentes no *sinter feed* “amortecessem” o manuseio e evitassem a degradação das frações mais grossas, constituintes do granulado.
- Além disso, é sugerido o desenvolvimento de pesquisas que busquem formas que permitam o rastreamento de partículas ao longo de testes de manuseio. Propõe-se a submissão dos grupos de partículas a meios que criem “identidades” sobre as mesmas, por exemplo, submetendo tais grupos a diferentes fontes de radioatividade de modo a tal radiação durar o tempo necessário para a ocorrência dos testes e permitir sua leitura e identificação após os mesmos. Assim, de posse da “identidade” de cada grupo de partículas, seria possível fazer a distinção das mesmas após os testes, conhecendo assim seus respectivos grupos de origem e permitindo uma análise exata do comportamento das partículas durante processos de manuseio. Tais estudos também auxiliariam o desenvolvimento da ideia de que o "conjunto global das partículas" trabalha de forma semelhante a um moinho autógeno.
- Por fim, a forma, equipamentos e processos em que o granulado estudado é manuseado e a maneira como é estocado são assuntos não abordados no presente trabalho, mas são de extrema importância e pertencentes a um vasto campo de

pesquisa. Desta forma, tais estudos são também aconselháveis, uma vez que podem resultar não somente na redução da degradação do material, mas também em possíveis economias nos processos de manuseio e transporte.

REFERÊNCIAS

- FAGERBERG, B.; SANDBERG, N.; Degradation of lump ores in transport; Proceedings of Second International Symposium on Transportation and Handling of Minerals, vol. 2, Rotterdam, Netherlands, 1973. p. 128–156.
- FORTES, F. F.; PEREIRA, C. A.; Manuseio, estocagem e qualidade do minério de ferro; *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, Vol. 9, No. 2, abr.-jun. 2012. p. 117-122.
- GRIFFITH, A. A.; The phenomena of rupture and flow in solids; *Philosophical Transaction of the Royal Society of London* A221, 1920. p. 163–198.
- LUBERA, E.; Frost weathering of selected rocks in the Tatra Mountains; *Quaestiones Geographicae* 33(1), Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, 2014. p. 75-88.
- NORGATE, T. E.; TOMPSITT, D. F.; BATTERHAM, R. J.; Computer simulation of the degradation of lump ores during transportation and handling; Second International Conference on Bulk Materials, Storage, Handling and Transportation, Wollongong, Australia, 1986. p. 20–24.
- REMPEL, A. W.; MARSHALL, J. A.; ROERING, J. J.; Modeling relative frost weathering rates at geomorphic scales; *Earth and Planetary Science Letters* 453, 2016. p. 87-95.
- SAHOO, R.; Degradation of steelmaking materials during handling; *Powder Technology* 176, 2007. p. 77–87.
- SAHOO, R. K.; ROACH, D.; Degradation behaviour of weathered coal during handling for the COREX process of iron making; *Powder Technology* 152, 2005a. p. 1–8.
- SAHOO, R. K.; ROACH, D.; Effect of different types of impact surface on coal degradation; *Chemical Engineering and Processing* 44, 2005b. p. 253–261.
- SAHOO, R. K.; ROACH, D.; Quantification of lump coal breakage during handling operation at the Gladstone Port, *Chemical Engineering and Processing* 44, 2005c. p. 797–804.
- SAHOO, R.K., WEEDON, D.M., ROACH, D.; Degradation model of Gladstone Port Authority's coal using a twin-pendulum apparatus; *Advanced Powder Technology*, Vol. 15, No. 4, 2004a. p. 459–475.

SAHOO, R.K., WEEDON, D.M., ROACH, D.; Single-particle breakage tests of Gladstone Port Authority's coal by a twin pendulum apparatus; *Advanced Powder Technology*, Vol. 15, No. 2, 2004b. p. 263–280.

TAVARES, M. L.; CARVALHO, R. M.; Modeling ore degradation during handling using continuum damage mechanics; *International Journal of Mineral Processing* 112-113, 2012. p. 1-6.

TEO, C. S.; WATERS, A. G.; NICOL, S. K.; Quantification of the breakage of lump materials during handling operations; *International Journal of Mineral Processing* 30, 1990. p. 159-184.

WATERS, A. G.; VINCE, A.; MAHONEY, M.; An experimental investigation of some factors influencing the degradation of lump ore; *Third International Conference on Bulk Materials, Storage, Handling and Transportation*, Newcastle, 1989. p. 84–88.

WEEDON, D. M.; WILSON, F.; Modelling iron ore degradation using a twin pendulum breakage device; *International Journal of Mineral Processing* 59, 2000. p. 195-213.

APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA ORIGINAL

| Distribuição granulométrica da amostra original | | | | |
|--|--------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho | Massa | Retido | | Passante |
| (mm) | (g) | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 4158,5 | 17,63 | 17,63 | 82,37 |
| 20 | 5595,4 | 23,72 | 41,34 | 58,66 |
| 15 | 5651 | 23,95 | 65,29 | 34,71 |
| 12,5 | 2653,1 | 11,25 | 76,54 | 23,46 |
| 10 | 2159,3 | 9,15 | 85,69 | 14,31 |
| 6,3 | 1983,3 | 8,41 | 94,1 | 5,9 |
| 3,15 | 563,69 | 2,39 | 96,49 | 3,51 |
| 1 | 210,34 | 0,89 | 97,38 | 2,62 |
| 0,5 | 80,5 | 0,34 | 97,72 | 2,28 |
| -0,5 | 538,16 | 2,28 | 100,00 | 0,00 |
| Total | 23593.29 | 100 | - | - |

APÊNDICE B – DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS RESULTANTES DOS TESTES DE IMPACTO

| Teste de Impacto - Partículas Compactas: -31,5 +25 mm | | | | |
|--|--------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho | Massa | Retido | | Passante |
| (mm) | (g) | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 605,97 | 73,23 | 73,23 | 26,77 |
| 20 | 163,53 | 19,76 | 93,00 | 7,00 |
| 15 | 47,11 | 5,69 | 98,69 | 1,31 |
| 12,5 | 5,84 | 0,71 | 99,40 | 0,60 |
| 10 | 0,00 | 0,00 | 99,40 | 0,60 |
| 8 | 1,11 | 0,13 | 99,53 | 0,47 |
| 6,3 | 0,86 | 0,10 | 99,64 | 0,36 |
| -6,3 | 3,02 | 0,36 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Compactas: -25 +20 mm | | | | |
|--|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 568,07 | 92,73 | 92,73 | 7,27 |
| 15 | 29,94 | 4,89 | 97,62 | 2,38 |
| 12,5 | 10,62 | 1,73 | 99,35 | 0,65 |
| 10 | 0,00 | 0,00 | 99,35 | 0,65 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 99,35 | 0,65 |
| 6,3 | 0,00 | 0,00 | 99,35 | 0,65 |
| -6,3 | 3,98 | 0,65 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Compactas: -20 +15 mm | | | | |
|--|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 15 | 337,33 | 92,87 | 92,87 | 7,13 |
| 12,5 | 14,10 | 3,88 | 96,75 | 3,25 |
| 10 | 4,08 | 1,12 | 97,87 | 2,13 |
| 8 | 3,38 | 0,93 | 98,81 | 1,19 |
| 6,3 | 0,00 | 0,00 | 98,81 | 1,19 |
| -6,3 | 4,34 | 1,19 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Compactas: -15 +12,5 mm | | | | |
|--|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 149,91 | 89,93 | 89,93 | 10,07 |
| 10 | 12,19 | 7,31 | 97,25 | 2,75 |
| 8 | 1,31 | 0,79 | 98,03 | 1,97 |
| 6,3 | 0,92 | 0,55 | 98,58 | 1,42 |
| -6,3 | 2,36 | 1,42 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Compactas: -12,5 +10 mm | | | | |
|--|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 10 | 77,76 | 69,05 | 69,05 | 30,95 |
| 8 | 23,11 | 20,52 | 89,57 | 10,43 |
| 6,3 | 4,09 | 3,63 | 93,20 | 6,80 |
| -6,3 | 7,66 | 6,80 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Compactas: -10 +8 mm | | | | |
|---|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 34,97 | 57,18 | 57,18 | 42,82 |
| 6,3 | 12,88 | 21,06 | 78,24 | 21,76 |
| -6,3 | 13,31 | 21,76 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Compactas: -8 +6,3 mm | | | | |
|--|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 6,3 | 12,41 | 45,63 | 45,63 | 54,38 |
| -6,3 | 14,79 | 54,38 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Acamadadas: -31,5 +25 mm | | | | |
|---|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 368,40 | 92,13 | 92,13 | 7,87 |
| 20 | 30,40 | 7,60 | 99,74 | 0,26 |
| 15 | 0,00 | 0,00 | 99,74 | 0,26 |
| 12,5 | 0,00 | 0,00 | 99,74 | 0,26 |
| 10 | 0,00 | 0,00 | 99,74 | 0,26 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 99,74 | 0,26 |
| 6,3 | 0,00 | 0,00 | 99,74 | 0,26 |
| -6,3 | 1,05 | 0,26 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Acamadadas: -25 +20 mm | | | | |
|---|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 205,79 | 44,60 | 44,60 | 55,40 |
| 15 | 136,28 | 29,53 | 74,13 | 25,87 |
| 12,5 | 73,42 | 15,91 | 90,05 | 9,95 |
| 10 | 16,48 | 3,57 | 93,62 | 6,38 |
| 8 | 14,01 | 3,04 | 96,65 | 3,35 |
| 6,3 | 2,27 | 0,49 | 97,15 | 2,85 |
| -6,3 | 13,17 | 2,85 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Acamadadas: -20 +15 mm | | | | |
|---|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 15 | 73,34 | 31,65 | 31,65 | 68,35 |
| 12,5 | 43,42 | 18,74 | 50,38 | 49,62 |
| 10 | 59,65 | 25,74 | 76,12 | 23,88 |
| 8 | 13,49 | 5,82 | 81,95 | 18,05 |
| 6,3 | 7,01 | 3,02 | 84,97 | 15,03 |
| -6,3 | 34,83 | 15,03 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Acamadadas: -15 +12,5 mm | | | | |
|---|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 56,33 | 44,15 | 44,15 | 55,85 |
| 10 | 20,92 | 16,39 | 60,54 | 39,46 |
| 8 | 11,16 | 8,75 | 69,29 | 30,71 |
| 6,3 | 11,43 | 8,96 | 78,24 | 21,76 |
| -6,3 | 27,76 | 21,76 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Acamadadas: -12,5 +10 mm | | | | |
|---|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 10 | 25,20 | 31,20 | 31,20 | 68,80 |
| 8 | 20,01 | 24,77 | 55,97 | 44,03 |
| 6,3 | 10,72 | 13,27 | 69,25 | 30,75 |
| -6,3 | 24,84 | 30,75 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Acamadadas: -10 +8 mm | | | | |
|--|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 6,29 | 15,08 | 15,08 | 84,92 |
| 6,3 | 10,86 | 26,04 | 41,12 | 58,88 |
| -6,3 | 24,56 | 58,88 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Acamadadas: -8 +6,3 mm | | | | |
|---|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 6,3 | 8,19 | 31,02 | 31,02 | 68,98 |
| -6,3 | 18,21 | 68,98 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Porosas: -25 +20 mm | | | | |
|--|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 263,86 | 73,40 | 73,40 | 26,60 |
| 15 | 11,20 | 3,12 | 76,52 | 23,48 |
| 12,5 | 36,86 | 10,25 | 86,77 | 13,23 |
| 10 | 12,94 | 3,60 | 90,37 | 9,63 |
| 8 | 14,80 | 4,12 | 94,49 | 5,51 |
| 6,3 | 4,70 | 1,31 | 95,80 | 4,20 |
| -6,3 | 15,11 | 4,20 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Porosas: -20 +15 mm | | | | |
|--|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 15 | 176,36 | 63,01 | 63,01 | 36,99 |
| 12,5 | 46,36 | 16,56 | 79,57 | 20,43 |
| 10 | 10,55 | 3,77 | 83,34 | 16,66 |
| 8 | 14,50 | 5,18 | 88,52 | 11,48 |
| 6,3 | 8,92 | 3,19 | 91,70 | 8,30 |
| -6,3 | 23,22 | 8,30 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Porosas: -15 +12,5 mm | | | | |
|--|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 17,81 | 19,26 | 19,26 | 80,74 |
| 10 | 9,24 | 9,99 | 29,25 | 70,75 |
| 8 | 17,01 | 18,39 | 47,64 | 52,36 |
| 6,3 | 10,47 | 11,32 | 58,96 | 41,04 |
| -6,3 | 37,96 | 41,04 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Porosas: -12,5 +10 mm | | | | |
|--|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 6,71 | 10,05 | 10,05 | 89,95 |
| 6,3 | 15,13 | 22,67 | 32,72 | 67,28 |
| -6,3 | 44,90 | 67,28 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Porosas: -10 +8 mm | | | | |
|---|----------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho (mm) | Massa (g) | Retido | | Passante |
| | | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 4,99 | 11,25 | 11,25 | 88,75 |
| 6,3 | 4,55 | 10,26 | 21,52 | 78,48 |
| -6,3 | 34,80 | 78,48 | 100,00 | 0,00 |

| Teste de Impacto - Partículas Porosas: -8 + 6,3 mm | | | | |
|---|--------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Tamanho | Massa | Retido | | Passante |
| (mm) | (g) | Simples (%) | Acumulado (%) | Acumulado (%) |
| 31,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 12,5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 10 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| 6,3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,00 |
| -6,3 | 17,45 | 100,00 | 100,00 | 0,00 |