



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica

# **ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO INTEMPÉRICA DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO**

**MARIANA MARTINS**

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Luís Marcelo M. Tavares, Ph.D.

Rio de Janeiro, RJ  
Março de 2013

# ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO INTEMPÉRICA DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO

Mariana Martins

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO METALÚRGICO.

Examinada por:



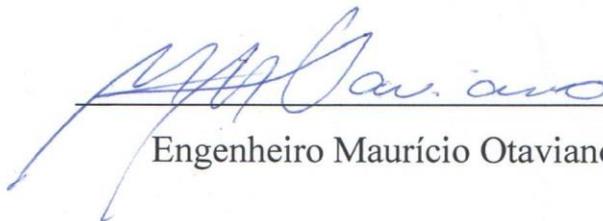
---

Prof. Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D.



---

Prof. Giselle de Mattos Araújo, M.Sc.



---

Engenheiro Maurício Otaviano, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO de 2013

Martins, Mariana

Análise da degradação intempérica de pelotas de minério de ferro /  
Mariana Martins - Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2013.

viii, 56 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luis Marcelo Marques Tavares

Projeto de Graduação - UFRJ/POLI/ Engenharia Metalúrgica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 47-49

1. Degradação. 2. Minério de Ferro. 3. Pelotas. 4. Envelhecimento.

I. Tavares, Luis Marcelo Marques. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Metalúrgica. III. Análise da degradação intempérica de pelotas de minério de ferro.

*“O que prevemos raramente ocorre; o que menos esperamos geralmente acontece.”*

*Benjamin Disraeli*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu tio Antonio José, sem o auxílio dele minha vida seria bem diferente e com certeza nada disso estaria acontecendo, assim como à sua família que me recebeu de braços abertos para que esse sonho fosse realizado: Rosália, Alayê e Raíssa.

Ao meu orientador Professor Luís Marcelo Marques Tavares pela paciência e pelos ensinamentos compartilhados, servindo de aprendizado profissional e pessoal.

À Professora Giselle pela ajuda oferecida durante toda realização dos ensaios e por ter aceitado ser minha avaliadora.

Ao Maurício Otaviano que foi um grande apoiador desse projeto desde início e que sempre esteve disponível para o auxílio nas dificuldades encontradas.

A toda equipe atual do LTM, em especial Rangler, Jacinto, Yemcy, Evandro, Emerson e Seu Luís, e também a todos aqueles que já passaram pelo laboratório, como Glaucio, Ian, Daniel Francioli, Milena, Rodrigo Mariano, Rafael, Erickson, Guilherme e Pedro por terem me dado suporte para a concretização desse trabalho. Além do técnico Marcus que sempre me ajudou a realizar os ensaios de compressão, mesmo durante a greve.

À minha família por ter confiado e me incentivado a alcançar meus objetivos, mesmo que distante de todos. Obrigada mãe e obrigada mano!

Às amigas do alojamento que sempre me incentivaram e ouviram, em especial Elaine, Sheila, Érica e Juliana. Aos amigos distantes que sempre me apoiaram: Claudilene, Renatha, Raquel, Aleson e Sherlene.

A todos os meus amigos da UFRJ que de alguma forma me ajudaram durante o período de desenvolvimento desse e de outros trabalhos. Não irei citar nomes, para não correr o risco de esquecer alguém.

Ao CNPq, UFRJ e à COPPETEC pelo apoio financeiro.

Resumo de Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica, como parte dos requisitos necessários para obtenção de grau de Engenheiro Metalúrgico.

Análise da degradação intempérica de pelotas de minério de ferro

Mariana Martins

Março/2013

Orientador: Luís Marcelo Marques Tavares

Curso: Engenharia Metalúrgica

A estocagem de toneladas de pelotas de minério de ferro em pilhas frequentemente se mostra como uma etapa necessária para as empresas pelotizadoras. Como a estocagem é realizada em pátios próximos aos portos, onde o produto fica exposto às diferenças climáticas durante dias, podendo em alguns casos chegar a meses. Devido este fato se fez necessário entender como esse período de estocagem afeta as propriedades físicas das pelotas. Fatores climáticos afetam a estrutura física de rochas e minérios, causando um fenômeno denominado de intemperismo. No caso das pelotas de minério de ferro, os efeitos deste fenômeno são conhecidos como envelhecimento. O envelhecimento de pelotas de minério de ferro é analisado no presente trabalho, tendo como objetivo compreender o comportamento das pelotas em diferentes posições da pilha de estocagem. Para tal, amostras de pelotas para redução direta e para alto forno foram expostas aos elementos do clima por até 232 dias, sendo analisadas as propriedades mecânicas das pelotas expostas a diferentes condições climáticas.

*Palavras-chave:* Degradação, Minério de Ferro, Pelotas, Intemperismo.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Engineer.

## ANALYSIS OF WEATHERING DEGRADATION IRON ORE PELLETS

Mariana Martins

March/2013

Advisor: Luis Marcelo Marques Tavares

Course: Metallurgical Engineering

The tons in piles of iron ore pellets in stockyards demonstrate how such stage is frequently necessary to pelletizing companies. The storage is performed in stockyards near the ports where the pellets are exposed to climatic changes during days and, in some cases, it can reach months. Due to this fact, it is necessary to understand how period in the stockyard can affect the physical properties of iron ore pellets. Climatic factors affect the physical structure of rocks and minerals, causing a phenomenon denominated as weathering. In the case of iron ore pellets this effect is called aging. The aging of iron ore pellet was analyzed in this present work aiming to understand the behavior of pellets in different positions of the stockpile. For this analysis it was used samples of pellets to direct reduction and to blast furnace. The pellets were exposed to elements of weather for until 232 days and the mechanical properties of the pellets exposed to different climatic conditions were analyzed.

Keywords: Degradation, Iron Ore, Pellets, Weathering

## Sumário

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivo.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>5</b>
3.1 Processo de Pelotização .....	5
3.2 Intemperismo .....	8
a) Posição das pelotas na pilha.....	13
b) Umidade relativa do ar e umidade das pelotas.....	13
c) Temperatura Ambiente .....	14
d) Precipitação Pluvial.....	14
3.3 Quantificando a degradação.....	14
a) Distribuição de tamanhos.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
b) Resistência à compressão.....	15
c) Resistência à fratura por impactos repetidos.....	17
d) Resistência à abrasão .....	21
<b>4. Metodologia .....</b>	<b>24</b>
4.1 Exposições das amostras .....	25
4.2 Análises .....	26
<b>5. Resultados e Discussão.....</b>	<b>31</b>
5.1. Caracterização das amostras como recebidas.....	31
5.2. Ensaio de envelhecimento .....	32
5.2.1. Variação das condições ambientais.....	32
5.3 Umidade.....	35
5.4 Resistência à compressão e energia de fratura .....	36
5.5 Índice de fragmentação superficial .....	40
5.6 Fratura por impactos repetidos.....	41
<b>6. Conclusões.....</b>	<b>45</b>
<b>7. Proposta para trabalhos futuros.....</b>	<b>46</b>
<b>8. Bibliografia .....</b>	<b>47</b>

# 1. Introdução

O ferro é o quarto elemento químico mais abundante da crosta terrestre, sendo de grande importância para plantas e animais. O primeiro relato da utilização do ferro como matéria prima para a fabricação de armas e utensílios ocorreu ainda na idade dos metais, porém para tal foi necessário conhecer técnicas de extração desse elemento. O avanço da tecnologia continuou durante a idade média e hoje em dia pode-se determinar o teor de ferro no minério, podendo assim determinar qual a melhor maneira de manipular este para o fim desejado (- Handbook, 1997).

A indústria siderúrgica utiliza o minério de ferro e seus aglomerados como matéria prima básica para a produção de aço. Cerca de 97% do minério de ferro extraído das minas é utilizada na siderurgia, sendo os 3% restantes utilizados nas indústrias de cimento, química, etc. (Siderurgia no Brasil, 2010). A Figura 1.1 ilustra todo o processo de obtenção do aço, desde a extração do minério de ferro até o aço líquido. Nesse caso a etapa de pelletização poderia ser substituída, por exemplo, por uma etapa de sinterização.

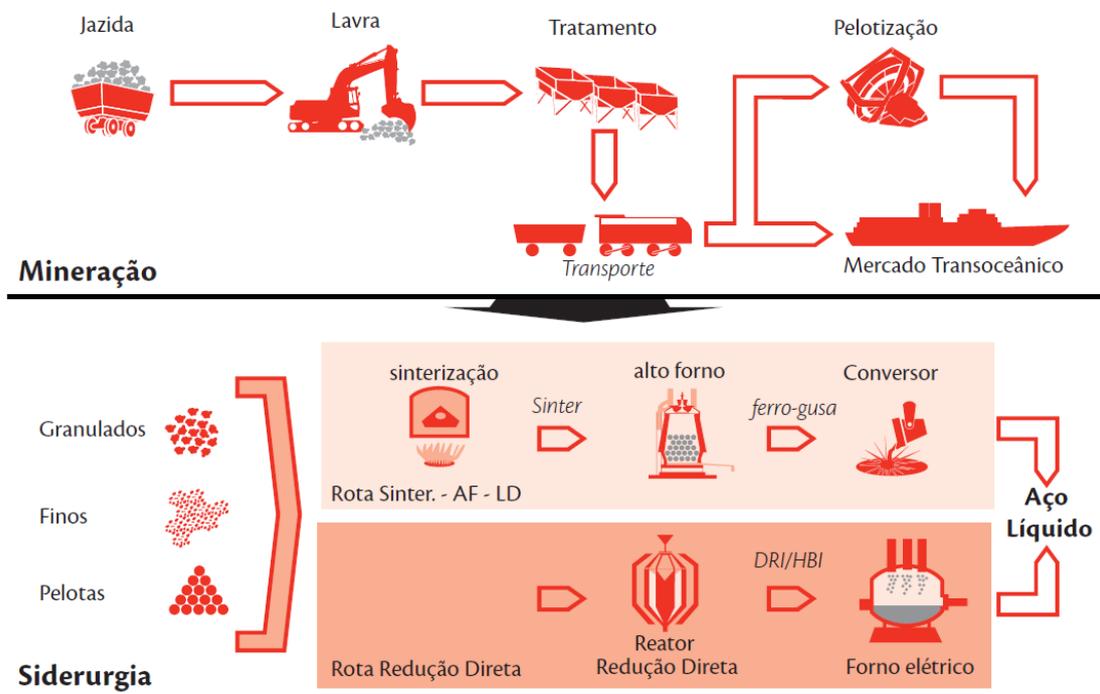


Figura 1.1 Etapa envolvidas na produção de minério e de obtenção do aço (Siderurgia no Brasil, 2010)

O Brasil é o maior exportador de minério de ferro, possuindo duas grandes áreas de mineração: uma no Estado de Minas Gerais e outra no Estado do Pará. Uma maneira de exportar o minério, quando fino, é realizar sua aglomeração, sendo que o produto dessa aglomeração pode ser: sinter, briquete e pelotas. O processo de pelotização é responsável pela geração de um produto com maior resistência ao manuseio e ao transporte, tendo também a vantagem de tornar viável o uso dos finos gerados pelo processo de cominuição. A fabricação de sinter para exportação não é viável devido à sua fácil fragmentação, de maneira que as usinas de sinterização, em sua maioria, estão localizadas próximas às usinas siderúrgicas. Isso evita a perda de integridade física e a geração de finos.

As pelotizadoras brasileiras, em sua grande parte, exportam sua produção para países localizados em diversos continentes e precisam garantir a qualidade das pelotas até o seu cliente. Isso se dá pelo fato que, apesar de terem boa resistência mecânica, ocorre em alguns casos a fragmentação, acompanhada da geração de finos. Os ensaios realizados após a produção das pelotas permitem avaliar como será o comportamento mecânico delas durante o manuseio e transporte. No entanto, com frequência as pelotas não são embarcadas imediatamente, necessitando ficarem estocadas em pátio e sujeitas aos elementos do clima.

No período de estocagem, as pelotas são armazenadas na forma de pilha, em pátios localizados próximos ao porto e, portanto, sendo submetidas às variações climáticas diárias, durante alguns dias, chegando até a meses. A estocagem em forma de pilhas de qualquer material proporciona que o material localizado na parte mais externa e superficial seja mais fortemente sujeito às variações climáticas, enquanto que o material localizado nas camadas mais interiores da pilha se encontra parcialmente protegido devido à grande quantidade de material presente ao seu redor, não sendo a princípio, fortemente influenciado pelos elementos do clima.

No caso de pilhas de pelotas, outra parcela importante é a base da pilha. Isso se deve à grande quantidade de água acumulada nessa região, como resultado de chuvas. Assim, têm-se três regiões em cada pilha que apresentam comportamentos distintos para um mesmo material.

O conhecimento do impacto negativo da exposição de pelotas aos elementos do clima na sua resistência à degradação durante o manuseio é relevante, pois permitirá ao pessoal técnico da usina de pelotização tomar a decisão sobre o tempo tolerável de estocagem, incluindo essa variável na complexa equação que pondera aspectos da logística da expedição de pelotas.

## **2. Objetivo**

Esse trabalho visa estudar como o tempo de estocagem e a maneira como as pelotas são estocadas influenciam a sua integridade física. A fim de melhor reproduzir o comportamento de pelotas durante a estocagem, será analisado o seu comportamento de acordo com a posição onde se encontra a pelota na pilha: se localizada na superfície, no interior da pilha ou na base, sob umidade saturada. Os efeitos da exposição até um total de 6 meses são analisados.

### **3. Revisão Bibliográfica**

Nesse capítulo é apresentada uma pequena revisão sobre o processo de pelotização, com destaque para as diferenças entre pelotas para alto forno e pelotas para redução direta. Porém a ênfase do capítulo é dada ao entendimento sobre o intemperismo e suas possíveis conseqüências sobre a resistência mecânica de pelotas durante o transporte e manuseio.

O capítulo ainda inclui uma revisão sobre alguns ensaios utilizados para medir as propriedades físicas das pelotas e os efeitos das variáveis ambientais sobre minérios em geral.

#### **3.1 Processo de Pelotização**

A pelotização foi desenvolvida como resultado da necessidade de utilização da grande quantidade de finos gerados devido à cominuição e ao manuseio de minérios e sínter. Os finos não devem ser introduzidos no forno de redução, pois diminuem a permeabilidade dos gases e, por esse motivo, são separados da carga antes da entrada do forno. Antigamente, as siderúrgicas descartavam esses finos. Foi então que os países com reservas limitadas de minério resolveram investir em pesquisas a fim de desenvolver um processo alternativo à sinterização e que permitisse a utilização desses finos (MEYER, 1980). Atualmente, o uso de pelotas no setor siderúrgico vem crescendo devido à: alta degradação e a redução na oferta dos granulados até então utilizados, restrições ambientais à expansão da sinterização, maior difusão da tecnologia de redução direta e crescente geração de *pellet feed* (Siderurgia no Brasil, 2010).

Com esse novo processo, pesquisas mostraram que as pelotas têm como principais características (MEYER, 1980):

- Distribuição uniforme e em uma larga de faixa de tamanho 19 – 5 mm
- Porosidade elevada, entre 25 e 30%
- Elevado teor de ferro, superior a 63%
- Composição mineralógica uniforme e de fácil redutibilidade.

A obtenção dessas propriedades é alcançada com a utilização de matérias primas específicas e métodos adequados de produção. A partir da matéria prima pode-se citar três etapas fundamentais na produção das pelotas:

- i. Preparação da matéria prima
- ii. Formação das pelotas verdes
- iii. Queima da pelota verde.

As matérias primas utilizadas são de dois grupos diferentes: minerais de ferro e minerais livres ou com baixo teor de ferro. Os minerais de ferro comumente utilizados possuem alto teor de ferro, proporcionando pelotas com 65% de ferro em sua composição. Os minérios de ferro utilizados são a magnetita, a hematita e em alguns casos minérios que sofreram intemperismo, como é o caso da limonita. Os minerais livres ou com baixo teor de ferro são utilizados para melhorar as propriedades das pelotas, estando elas úmidas, secas ou endurecidas (MEYER, 1980), esses minerais são denominados siderúrgicas como aditivos.

A ligação entre as partículas de ferro é conseguida com a utilização de ligantes, sendo o principal a água. Outro ligante utilizado comumente é a bentonita, que também é utilizada como aditivo, proporcionando características específicas às pelotas. A bentonita é composta pelos minerais quartzo, mica, feldspato e caulina.

Os compostos de cal utilizados são o carbonato,  $\text{CaCO}_3$ , e o hidróxido de cálcio,  $\text{Ca(OH)}_2$ . Eles funcionam tanto como ligante, como aditivo básico, reagindo primeiramente com a ganga ácida durante o endurecimento.

O processo de obtenção do ferro primário pode ser realizado por duas rotas diferentes: Alto forno (fusão redutora) ou Redução direta.

A diferença entre esses processos está na forma como é realizada a redução do minério e o produto obtido. As pelotas são utilizadas em ambos os tipos de processo de redução, que demandam diferentes composições necessárias para as mesmas suportarem as solicitações exigidas durante a redução (ARAÚJO, 1997).

A figura 3.1 mostra um fluxograma de uma usina de pelletização, com todas as etapas do processo. Independente do processo utilizado na produção do aço, uma das

variáveis que vai determinar a qualidade do produto final é a matéria prima utilizada. A pelota é composta por hematita e/ou por magnetita, que são os minerais portadores de ferro.

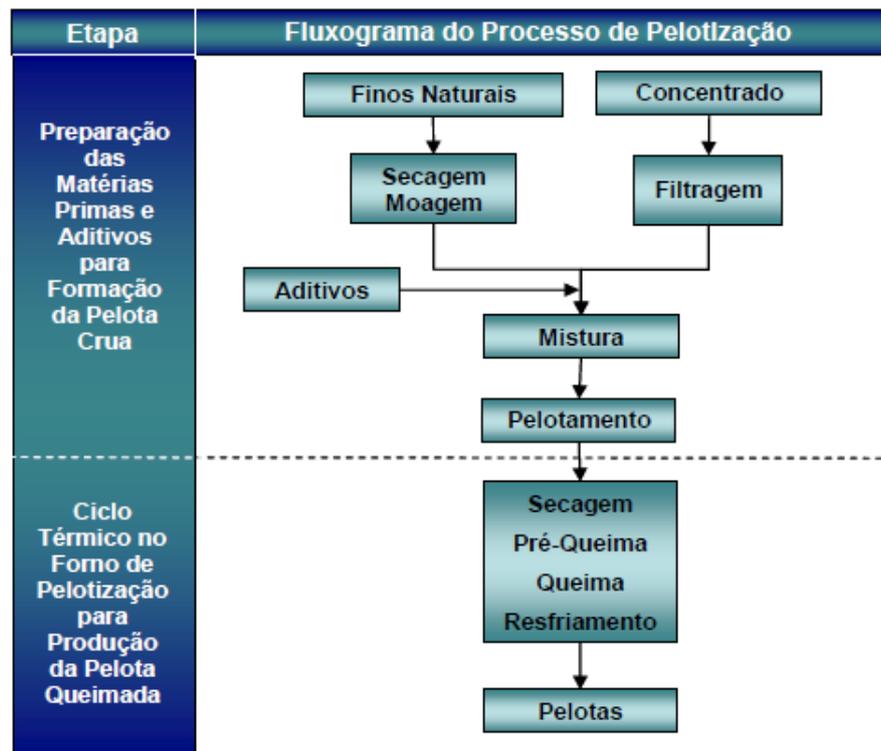


Figura 3.1 Etapas da pelotização (COSTA, 2008)

#### a) Pelotas para Alto Forno (PAF)

O alto forno é um forno de redução que utiliza o monóxido de carbono como gás redutor e transformam as pelotas de minério de ferro em ferro gusa, o monóxido de carbono é proveniente do combustível. A temperatura de redução é muito alta (superiores à 1000°C) sendo necessária a adição de carvão vegetal para atingir tal temperatura no processo.

Como o processo ocorre em altas temperaturas, o óxido de ferro é reduzido e a ganga dá origem à escória. A imiscibilidade e a diferença de densidade promovem a separação, por ação da gravidade, das fases metal e escória em duas camadas (HECK, <<http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06632/Redcarb.pdf>>). A escória, sobrenadante, deve apresentar baixa viscosidade a fim de permitir que as gotas de ferro líquido, mais densas, continuamente produzidas mais acima, no reator, tenham a possibilidade de atravessá-las. Os finos de carvão vegetal, presente na forma de coque, são extraídos pela parte superior do alto forno.

A fim de suportar a descida no alto forno, passando por todas as etapas de redução é necessário que pelotas tenham boa resistência mecânica e, ao fim do processo, produza o metal e a escória. A introdução dos aditivos tem como objetivo melhorar as propriedades físico-mecânicas e alcançar os propósitos metalúrgicos (MEYER, 1980).

### ***b) Pelotas para Redução Direta (PRD)***

Nesse processo, a carga metálica composta por pelotas de minério de ferro é reduzida pelos gases redutores CO e H<sub>2</sub>, não havendo fusão da carga, por isso é denominado de redução direta. O processo gera um produto final sólido e opera a temperaturas mais baixas que do alto forno (< 1000°C).

A redução ocorre com a utilização de um agente redutor, que não inclui o ferro nem o carbono sólido, não havendo geração de escória. O agente redutor retira o oxigênio presente na pelota na forma de óxidos de ferro, deixando todas as impurezas e ganga no produto reduzido, o ferro esponja, DRI ou briquetes (HECK, < <http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06632/Reddir.pdf>>). Por isso, as pelotas utilizadas nesse processo devem ser tão puras quanto possível (CANO e MARTINEZ, 1987). Dentre as vantagens desse processo estão: a não utilização de coque, a possibilidade de aproveitamento de outros tipos de agentes redutores, bem como a possibilidade de trabalhar com flexibilidade e escalas reduzidas de produção (MEYER, 1980).

GUPTA e GAUTAM (2003) em suas pesquisas mostraram que com um teor de 4% de bentonita, na preparação de um tipo específico de pelota para redução direta a resistência à compressão se eleva chegando a 200 kg, que é um valor considerado bom pelas pelletizadoras. Porém esse teor de aditivo não é praticado, devido à produção excessiva de ganga.

### **3.2 Intemperismo**

O intemperismo é o conjunto de processos que levam à degradação e à decomposição das rochas. Estes processos estão relacionados com dois fatores: a natureza da rocha e a condição do ambiente a qual a rocha é exposta (AZEVEDO E DALMOLIN, < <http://pt.scribd.com/doc/55283648/Intemperismo-ICS-7cap-2006> >).

No estudo em questão, está sendo tratado o caso de um minério que sofreu um processo de introdução de aditivos e que sofreu um tratamento térmico, a queima.

O intemperismo pode ser de dois tipos: físico ou químico. No presente trabalho será tratado apenas do intemperismo físico, que é definido como o processo que leva à fragmentação da rocha, sem modificação significativa em sua estrutura química ou mineralógica. Esta quebra pode se dar devido as seguintes variáveis: variação de temperatura, gelo, precipitação de sais, etc.

MEYER (1980) em seu livro clássico sobre pelotização afirmou que as pelotas são resistentes ao período de estocagem e às condições reinantes no inverno. Porém, estudos mais recentes mostraram que as variações de temperatura, juntamente com a ocorrência de chuvas podem agir diretamente sobre alguns aditivos utilizados na sua formação (FONSECA, 2003). Um termo comumente usado para o efeito do intemperismo sobre as pelotas é envelhecimento, que caracteriza a perda de resistência mecânica após um período de estocagem.

Em seu estudo, sobre o envelhecimento de pelotas, FONSECA (2003) realizou a simulação física de condições críticas de exposição. A exposição das pelotas foi realizada em telas, evitando que blocos de pelotas fossem formados, proporcionando assim maior contato possível da superfície das pelotas com o ambiente. As telas com as pelotas foram colocados em pátios abertos, localizados próximos ao porto de Ubu (Fig. 3.2).

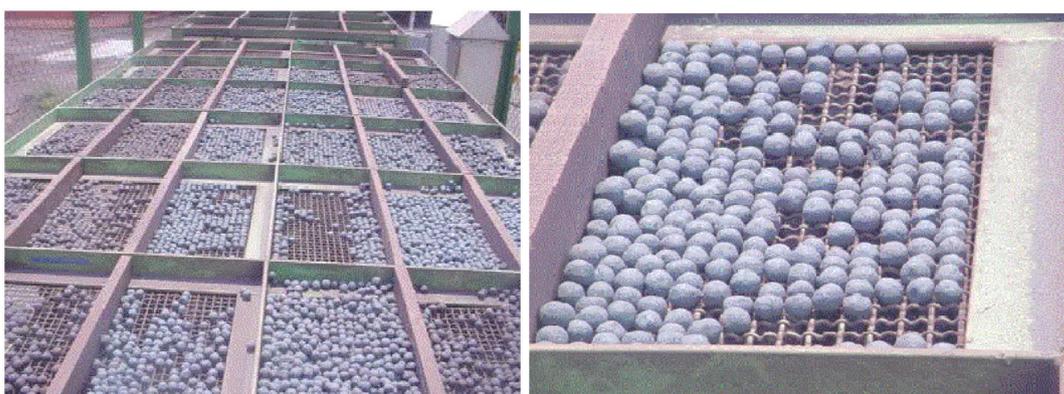


Figura 3.2 Exposição realizada por FONSECA (2003)

Diferentes amostras foram utilizadas para a realização desse trabalho, sendo que, aqui serão analisados os resultados para duas amostras que foram estudadas: A3 e A11. Essas amostras possuem mesma basicidade binária e mesmo teor de MgO,

diferenciando-se apenas pelo fato que a primeira foi resfriada naturalmente, enquanto que a segunda foi resfriada com água. A figura 3.3 mostra a variação da resistência à compressão das pelotas após diferentes períodos de exposição, podendo-se observar que ocorre uma queda significativa da resistência inicial para a amostra resfriada com água. Também pode-se observar que há um comportamento cíclico durante esse período. Infelizmente, Fonseca não relacionou esse comportamento com as variações climáticas, devido indisponibilidade de dados meteorológicos, que poderiam responder ao menos em parte esse comportamento cíclico da variação da resistência.

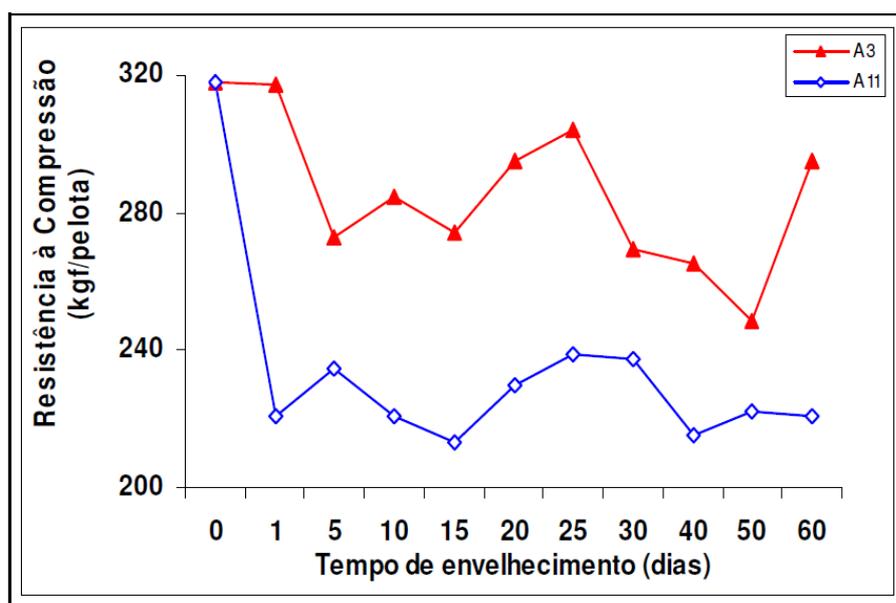


Figura 3.3 Resistência à compressão em função do tempo de envelhecimento (FONSECA, 2003)

A fim de compreender o efeito da exposição nas pelotas, FONSECA (2003) utilizou microscopia ótica para verificar possíveis variações estruturais. As superfícies apresentadas nas figuras 3.4 e 3.5 mostram a análise realizada a uma distância de 2mm da superfície da pelota para o seu interior, sendo que a superfície da pelota encontra-se localizada na esquerda de todas as figuras. A análise dessas imagens permitiu concluir que as pelotas que foram estocadas por 60 dias sofreram a perda de algum material da superfície, apresentando maior concentração de vazios. Segundo o autor, isso pode estar relacionado ao elevado valor de basicidade binária dessa formulação.

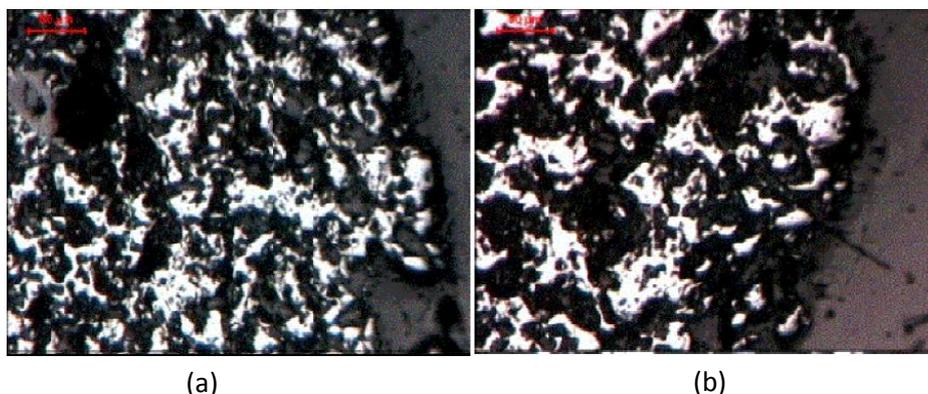


Figura 3. 4 Fotomicrografias de microscopia eletrônica de varredura (Amostra A3 – 2 mm a partir da superfície da pelota, onde (a) 1° dia e (b) 60° dia). Aumento de 200x (FONSECA, 2003)

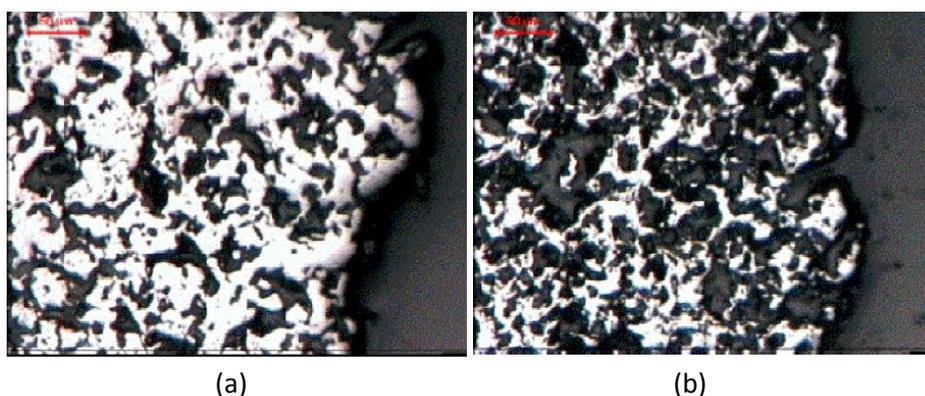


Figura 3. 5 Fotomicrografias de microscopia eletrônica de varredura (Amostra A11 – 2 mm a partir da superfície da pelota, onde (a) 1° dia e (b) 60° dia). Aumento de 200x (FONSECA 2003)

A figura 3.6 apresenta os resultados obtidos por FONSECA (2003) para as amostras A1 e A9, essas amostras apresentam a mesma basicidade binária das amostras A3 e A11(Figura 3.3), porém com menor teor de MgO. A diferença entre as amostras A1 e A9 está na maneira como ocorreu o resfriamento: A1 foi resfriada naturalmente e A9 foi resfriada com água. Segundo o autor, a diferença entre a resistência à compressão das pelotas com mesma composição está diretamente ligada à maneira como ocorreu o resfriamento.

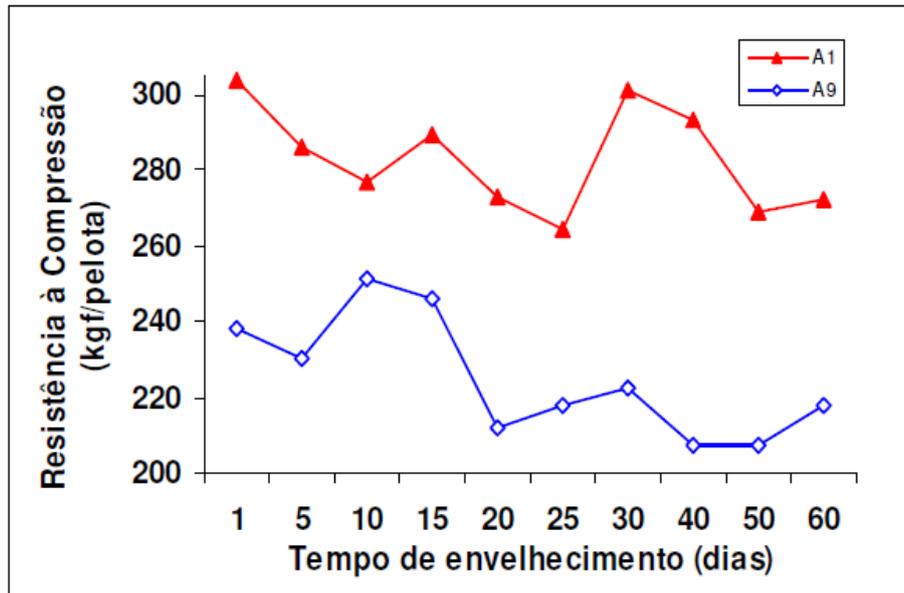


Figura 3.6 Resistência à compressão em função do tempo de envelhecimento (FONSECA, 2003)

A fim de comprovar a relação entre a presença de pontos brancos na superfície das pelotas e de CaO, foram realizadas análises em MEV/EDS. A figura 3.7 (a) mostra uma imagem do ponto branco feita pelo MEV, enquanto que na figura 3.7 (b) observa-se o EDS do material presente no ponto branco. Observa-se um pico no teor de Ca presente nesses pontos brancos, o que simboliza uma possível lixiviação do CaO presente nas pelotas.

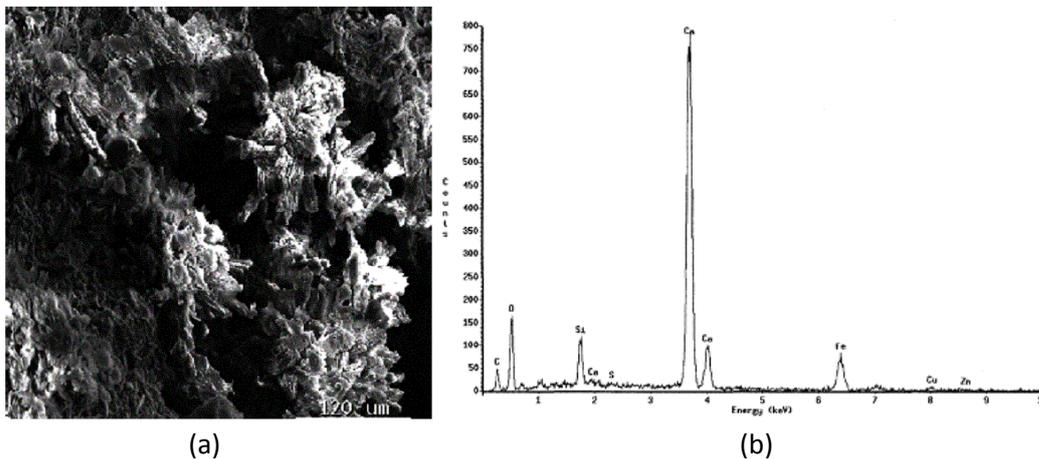


Figura 3.7 (a) Detalhe do ponto branco na superfície da pelota, com aumento de 200x e (b) espectro da análise em microsonda da região (FONSECA, 2003)

A conclusão do autor foi que a presença de  $\text{CaCO}_3$  não está associada às fases silicatadas presentes na pelota, porém pode estar associada à umidade na superfície das pelotas. Ele observou que as pelotas que foram resfriadas com água apresentaram maior

teor de carbonatos lixiviados já no primeiro dia de envelhecimento, quando comparadas com as amostras que foram resfriadas naturalmente. Assim, o autor relacionou a água do resfriamento com a perda de cálcio superficial e uma aceleração do processo de envelhecimento.

Tendo em vista, entretanto, que o estudo visou apenas reproduzir as condições mais severas encontradas na parte mais externa da pilha e não houve controle das condições ambientais durante o tempo de exposição, o autor sugeriu que trabalhos futuros levassem em consideração a posição das pelotas na pilha, a umidade relativa do ar, a temperatura ambiente e precipitação pluvial, entre outras variáveis.

A fim de compreender como essas variáveis afetam as propriedades físicas das pelotas, uma análise detalhada da influência de cada uma é realizada a seguir.

#### **a) Posição das pelotas na pilha**

A estocagem das pelotizadoras se dá na forma de pilhas, compostas por centenas a milhares de toneladas de material. Estudos realizados com pilhas de carvão mostraram que, dependendo do material analisado, a posição em que se encontra o carvão altera as propriedades físicas e químicas (OLIVEIRA, 2008). Essa afirmação poderia ser utilizada também para descrever o seu efeito em pelotas. Infelizmente, no caso do carvão, as análises foram feitas com pilhas de pequeno volume, de maneira que, pode-se concluir que, no caso das pelotas, na qual a estocagem se dá em grandes proporções esse efeito seria diferenciado.

#### **b) Umidade relativa do ar**

A umidade relativa do ar é a relação entre a quantidade de água existente no ar e a quantidade máxima que poderia haver na mesma temperatura. O vapor de água sobe para a atmosfera e se acumula em forma de nuvens, mas uma parte passa a compor o ar que circula na atmosfera. Esse fenômeno faz com que materiais expostos à umidade absorvam ou cedam água para o ambiente com o intuito de manter o equilíbrio do ambiente, por esse motivo é de fundamental importância o controle dessa variável durante um estudo intempérico (SENTELHAS, 2009).

As pelotas, por apresentarem uma estrutura porosa, podem sofrer grandes variações de acordo com a umidade relativa do ar durante o período de estocagem.

### **c) Temperatura Ambiente**

GIROUX *et al* (2006), em seu estudo sobre o comportamento de pequenas quantidades de carvões estocados em diferentes temperaturas, constatou que ocorreram mudanças nas propriedades químicas e reológicas desse minério. Segundo eles, em temperatura muito baixa ( $< 0^{\circ} \text{C}$ ) o efeito da oxidação é bem menor que em carvão estocado em temperaturas elevadas ( $> 40^{\circ} \text{C}$ ). Conhecidos os efeitos da temperatura sobre o minério de carvão, temos que entender como a temperatura afeta as propriedades das pelotas.

A variação de temperatura diária causa um fenômeno de dilatação ou contração, em diferentes intensidades no interior das pelotas. No Brasil, onde a variação térmica diária pode chegar até  $15^{\circ} \text{C}$ , isso pode criar tensões na superfície das pelotas, que tendem a sofrer expansão, podendo até ocorrer a fratura.

### **d) Precipitação Pluvial**

A precipitação pluvial é a forma principal pela qual a água retorna da atmosfera para a superfície terrestre, após os processos de evaporação/transpiração e condensação. A quantidade e a distribuição das chuvas definem o clima de uma região (SENTELHAS, 2009). Cada região do país tem uma distribuição própria de chuvas ao longo do ano, sendo que essa distribuição depende de diferentes fatores que determinam o clima da região. No sudeste do Brasil o período de chuvas intensas fica concentrado no período de dezembro a março.

## **3.3 Quantificando a degradação**

A figura 3.8, mostra um circuito de manuseio e transporte de minério de ferro desde o beneficiamento até o alto forno, passando pelo processo de pelletização. Analisando a figura pode-se observar a presença de vários estágios de transferência de material que acontecem em diferentes alturas e assim identificar possíveis pontos onde o manuseio e o transporte causam maior degradação.

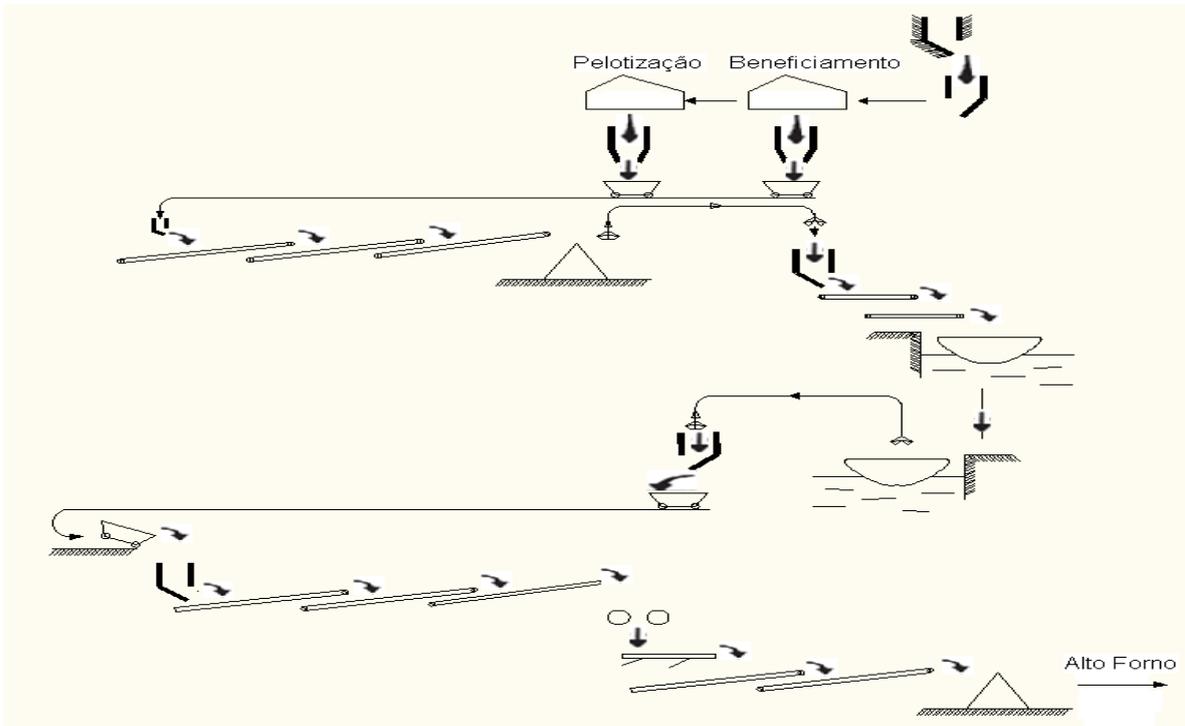


Figura 3.8 Circuito das etapas de transporte do minério de ferro do beneficiamento até o alto forno

Assim, a fim de compreender cada variável que influencia na degradação, a seguir serão analisados alguns dos ensaios usuais e outros alternativos para a avaliação da suscetibilidade de pelotas à degradação.

#### a) Resistência à compressão

A ISO 4700 (Determinação de resistência à compressão) determina o uso de 60 pelotas, contidas na faixa entre 16 mm e 12,5 mm. Pressionada uma a uma até a ocorrência de quebra, a célula de carga utilizada para a realização do ensaio, segundo a norma, deve ser no mínimo de 10 kN. O esmagamento de cada pelota fornece uma curva, que relaciona a deformação sofrida pela pelota com a força aplicada.

Segundo MERKLIN e CHILDS (1961), a baixa resistência à compressão é uma das principais causas de multas contratuais impostas pelos clientes, o que torna essencial a análise de rotina da resistência à compressão nas pelotizadoras. No entanto, as forças médias de esmagamento apresentadas durante o ensaio são superiores àquelas que acontecem durante o transporte e manuseio, o que faz com que o uso exclusivo

desse valor leve a uma limitada previsibilidade na degradação durante o manuseio de pelotas.

A resistência à compressão de pelotas é influenciada tanto pelas características das matérias primas quanto pelas condições de operação do processo produtivo. Por exemplo, SÁ *et al* (2004) mostraram que a hematita especular quando recristaliza, forma grãos maiores com contornos arredondados, conferindo maior resistência mecânica, principalmente em pelotas de baixa basicidade, como as pelotas utilizadas para redução direta. Por outro lado, a magnetita, no processo de resfriamento, sofre reoxidação, transformando-se em hematita, proporcionando uma diferença de volume e o aparecimento de forças de cisalhamento, que facilitam a fratura do minério. Ainda segundo SÁ *et al* (2004), a goethita a 300 °C se transforma em hematita, mas que apresenta microporosidade. Nestes casos, tanto a magnetita como a goethita influenciam negativamente na resistência à compressão.

ABOUZEID e SEDDIK (1981) mostraram que dependendo do minério utilizado e do teor de umidade presente na pelota seca e não queimada há uma grande diferença na sua resistência à compressão. Pelotas produzidas com minério de ferro Baharia apresentaram maior resistência, apesar do alto teor de umidade, enquanto que as pelotas feitas com minério Eastern Desert perdem resistência devido a umidade (Fig 3.9). Assim, o efeito da umidade está também relacionado às diferentes mineralogias desses minérios, pois o minério de Baharia possui material argiloso em sua composição formando assim pelotas mais compactas, ou seja, mais resistentes. O minério de Aswan tem uma maior quantidade de finos durante a pelletização, resultando em aderência nos pratos durante o ensaio.

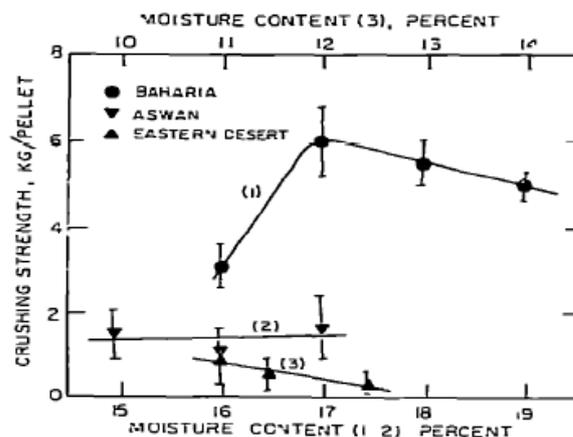


Figura 3.9 Resistência à compressão, kg/pelotas, em função do teor de umidade para alguns minérios (ABOUZEID e SEDDIK, 1981)

Um estudo realizado por GUPTA e GAUTAM (2003) mostrou que a resistência à compressão de pelotas pode ser controlada pelo tempo de sinterização e pelos tipos e dosagens de aditivos.

### **b) Resistência à fratura por impactos repetidos**

TAVARES e CARVALHO (2008) propuseram um modelo capaz de prever a degradação do minério de ferro durante o manuseio. O modelo é baseado na combinação de princípios da mecânica de danos e na teoria de contatos de Hertz. Ele utiliza como base a distribuição das energias de fratura, estimada a partir de ensaios na célula de carga de impacto. A partir do modelo desenvolvido para o minério de ferro, os pesquisadores afirmaram poder utilizar esse modelo para outros minérios, a partir do conhecimento de parâmetros característicos do minério de interesse.

A aplicação desse modelo ainda demandava a realização de ensaios de fratura por impactos repetidos, a partir dos quais o único parâmetro do modo é ajustado (OLIVEIRA, 2008). Os resultados experimentais e de modelagem mostraram que a resposta do material aos impactos repetidos é influenciada tanto pela resistência das partículas quanto a intensidade do impacto.

Uma maneira alternativa de avaliar a resistência ao impacto repetido é realizar o ensaio de auto fratura, ensaio no qual as partículas são soltas a partir de uma certa altura até que ocorra a quebra (TEO *et al*, 1990).

Um conceito utilizado na realização desse tipo de experimento é a discriminação entre os mecanismos de quebra de partículas. Há dois tipos de quebra: volumétrica e superficial. A quebra volumétrica consiste no processo de quebra no qual partícula perde a integridade, gerando fragmentos em uma ampla faixa granulométrica. Por outro lado, na quebra superficial ocorre apenas liberação de finos que se encontram na superfície da partícula, enquanto a partícula original se mantém íntegra (TEO *et al*, 1990). A figura 3.10 mostra detalhadamente o que acontece em cada tipo de quebra.

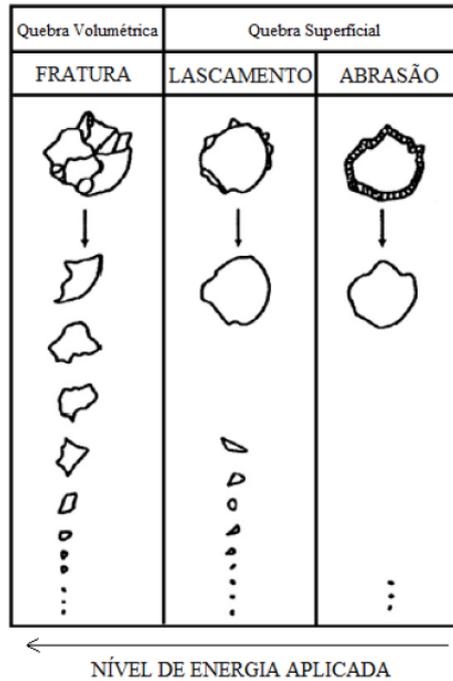


Figura 3.10 Mecanismos de quebra na degradação de minério de ferro em função da energia aplicada no impacto (modificado de TEO *et al*, 1994)

A fim de melhor compreender a relação entre a energia de impacto, número de impactos e quebra, deve-se analisar a figura 3.11 a qual apresenta o número de impactos necessários para quebrar uma partícula de diferentes minerais em função da energia. Evidentemente, é necessário um número maior de impactos para fraturar uma partícula quando é aplicada a essa partícula uma baixa energia de colisão, havendo apenas a liberação de finos da superfície. Porém no lascamento ocorre a liberação de fragmentos maiores da partícula, tornando até difícil a avaliação do tipo de quebra ocorrido, se volumétrica ou superficial. A fim de evitar qualquer ambigüidade considera-se como quebra volumétrica a perda de mais de 10% da massa original da partícula em um único evento de impacto (TAVARES e KING, 2002).

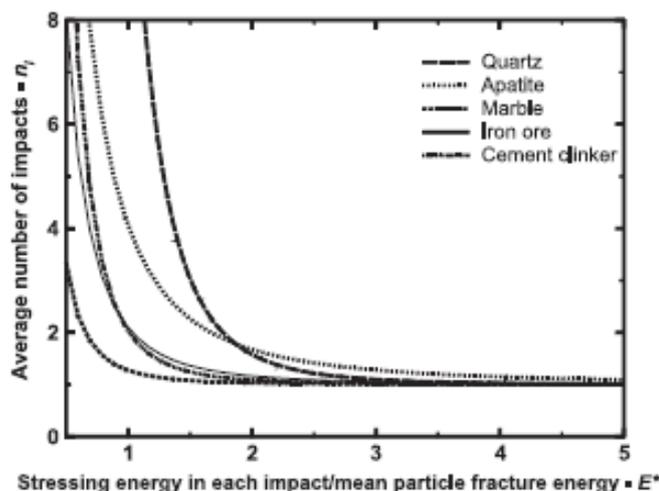


Figura 3.11 Relação entre o número de impactos necessários para fraturar uma partícula e a energia de impacto relativa (TAVARES, 2004)

Estudos realizados com bauxitas mostraram que o teor de umidade é uma variável que influencia na resistência das partículas e na energia de fratura (TAVARES e LIMA, 2006). Esse efeito pode ser explicado pela elevada porosidade do material e pela elevada percentagem de materiais argilosos na sua composição, que intensificam o comportamento plástico do minério, quando úmido. Como as pelotas de minério de ferro também são porosas, é possível também concluir que o comportamento da bauxita deve ser também observado com pelotas. Estudos feitos com pelotas verdes produzidas com diferentes minérios apresentaram diferentes comportamentos dependendo do teor de umidade presente (Figura 3.12). Conforme já citado, o minério de ferro Baharia tem em sua composição uma considerável quantidade de material argiloso, enquanto que o minério de ferro Aswan tem também grande quantidade de material argiloso. Porém a diferença de comportamento entre estes dois minérios encontra-se na distribuição granulométrica do material, uma vez que o minério de Aswan tem mais quantidade de finos. Isso proporciona uma maior absorção da umidade e influencia negativamente na resistência ao impacto das pelotas fabricadas com o minério de ferro de Aswan (ABOUZEID e SEDDIK, 1981). A figura 3.13 mostra que a porcentagem de finos é uma variável que influencia a resistência ao impacto das pelotas.

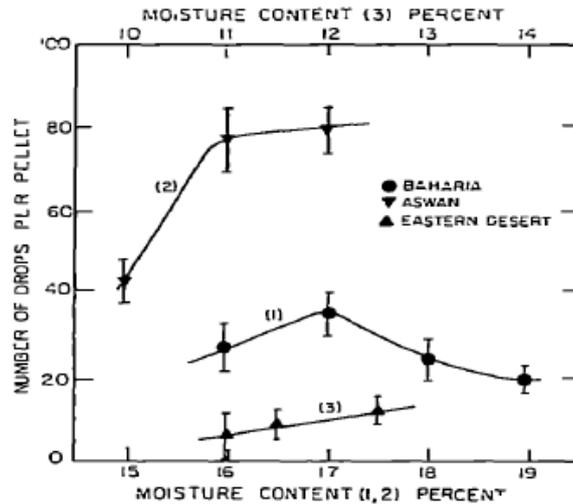


Figura 3.12 Número de impactos necessários para a fratura de pelotas não queimadas em função do teor de umidade, para diferentes minérios de ferro (ABOUZEID e SEDDIK, 1981). Altura utilizada nos ensaios de queda foi 0,5 m.

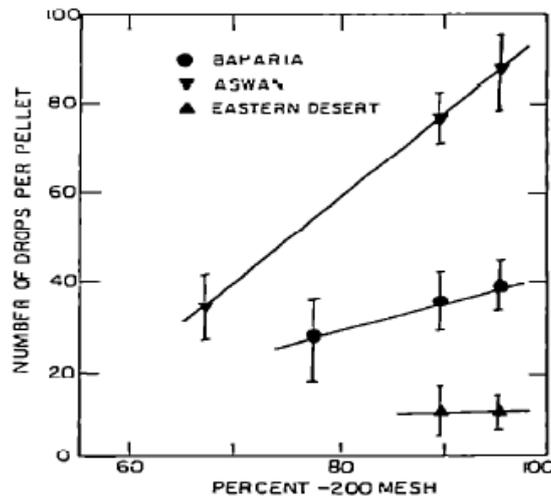


Figura 3.13 Número de impactos necessários para a fratura de pelotas não queimadas em função da distribuição granulométrica do minério utilizado para preparar as pelotas, para diferentes minérios de ferro (ABOUZEID e SEDDIK, 1981). Altura utilizada nos ensaios de queda foi 0,5 m.

SAHOO (2007) em seu estudo que visou caracterizar a degradação de carvões durante ao manuseio, relacionou o tempo de estocagem com a geração de finos durante o ensaio de impacto. Pode-se observar na figura 3.14 que o tempo de envelhecimento influencia na geração de finos resultantes de impactos sucessivos uma mesma energia. Aparentemente após a exposição por período de 9 meses, a geração de finos nesses impactos é estabilizada. No entanto, até esse período há um aumento constante na geração de finos com o aumento do tempo de exposição.

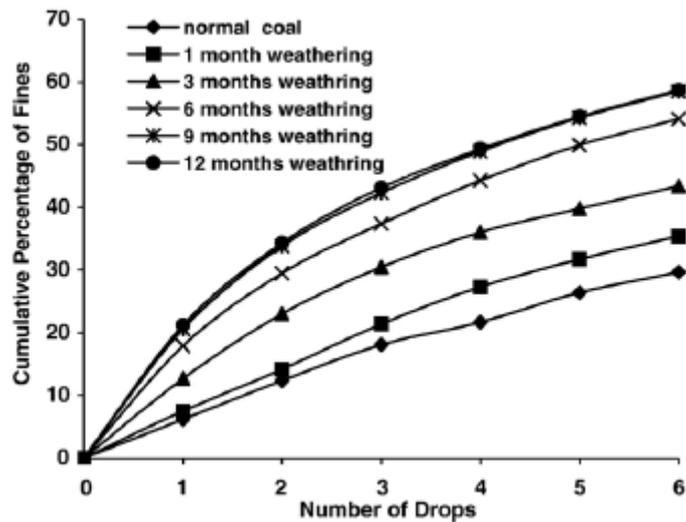


Figura 3.14 Porcentagem de finos em função do número de impactos de carvão envelhecido (SAHOO, 2007)

### c) Resistência à abrasão

A medida de abrasão segue o padrão ISO 3271 (Determinação da resistência à abrasão) e é realizada por meio de um ensaio que é muito utilizado pela indústria siderúrgica por ser de fácil e rápida realização. Pode ser definido como um experimento que mede a resistência à degradação por quebra volumétrica (LITSTER *et al.*, 1987). A Figura 3.15 mostra um esquema do movimento das partículas dentro do tambor, na qual pode-se observar que as partículas são arrastadas até certa altura pelos *lifters*, caindo sobre a chapa do tambor e reiniciam o movimento. Os *lifters* são aletas localizadas em lados opostos do moinho que proporcionam a elevação do material até uma altura máxima, correspondente ao diâmetro do tambor, cada *lifter* apresenta 5 cm de comprimento (Fig. 3.15). No ensaio padrão esses tambores giram uma velocidade de 20 rpm.

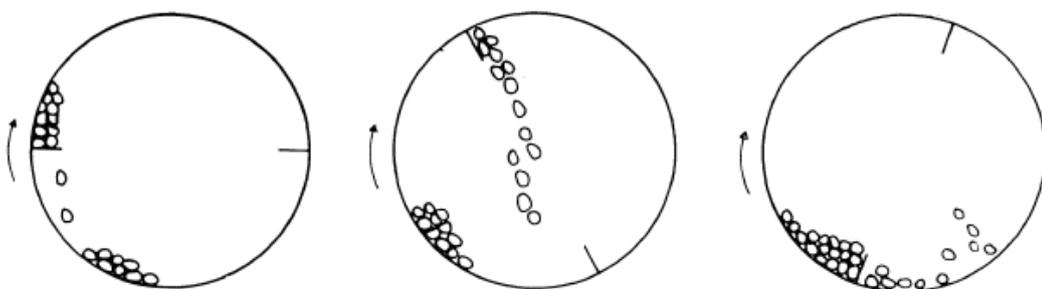


Figura 3.15 Esquema do funcionamento do moinho de tamboramento (LITSTER *et al.*, 1987)

Embora nesse ensaio ocorra à quebra tanto superficial quanto volumétrica, a quebra superficial é aparentemente a mais importante, no caso das pelotas. A distribuição granulométrica após transcorrido o período de tamboramento permite o cálculo do índice de tamboramento e o de abrasão. A figura 3.16 apresenta um gráfico da quantidade de síter que permanece com o tamanho inicial em função do tempo de tamboramento. TEO *et al.*(1990) observaram que inicialmente há uma alta taxa de degradação devido à quebra volumétrica, sendo que depois de três ou quatro minutos, a taxa de degradação diminui. Essa redução pode ser observada em todos os tamanhos.

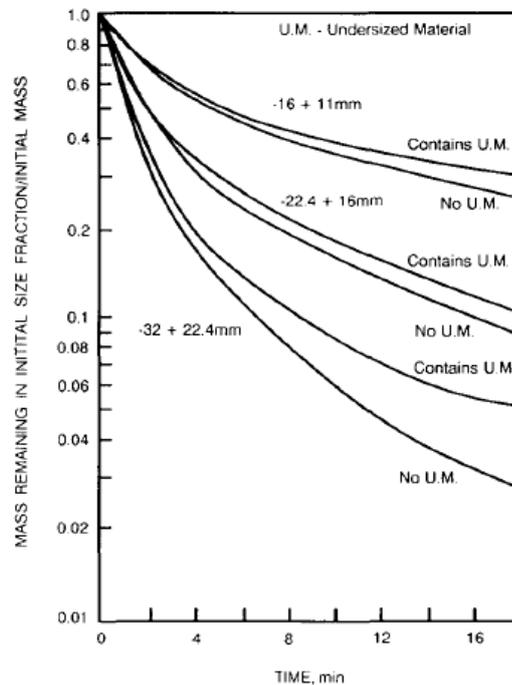


Figura 3.16 Efeito da faixa granulométrica de síter e da massa de material com tamanho inicial pelo tempo de tamboramento (TEO *et al.*, 1990)

LITSLER *et al.* (1986) também utilizaram esse ensaio na degradação de carvão e concluíram que há uma correlação entre a taxa de abrasão e a resistência à compressão das partículas de carvão (Figura 3.17). Segundo eles, o mecanismo chave para a produção de finos nesse experimento não é a abrasão, mas a colisão entre as partículas e o fundo do tambor, durante a queda. Inicialmente há predominância da quebra volumétrica das partículas trincadas e menos resistentes, depois se dá a estabilização da quebra volumétrica e passa a ocorrer apenas a quebra superficial.

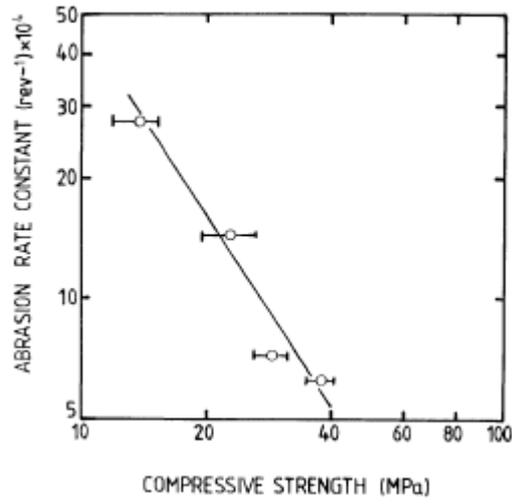


Figura 3.17 Efeito da resistência à compressão sobre a taxa de abrasão de partículas de carvão (LITSTER *et al.*, 1986)

## 4. Metodologia

Uma usina de pelotização localizada no Brasil enviou amostras acondicionadas em dois tambores, sendo um tambor com pelotas para alto forno, denominado de PAF, com aproximadamente 200 kg e outro tambor com pelotas para redução direta, denominado de PRD, aproximadamente 200 kg.

Cada amostra, recebida no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM) passou pelo seguinte processo de homogeneização: todo o lote foi dividido em sacos com aproximadamente 40 kg e em seguida foi feita uma pilha alongada, da seguinte forma: com o auxílio de um recipiente grande cheio da amostra do saco 1 foi descarregado a uma velocidade constante de forma que uma pilha fosse formada, como é mostrado na figura 4.1 (a) e (b). Ao final da pilha amostras contidas no saco 2 enchiam o recipiente e então a descarga era feita do ponto onde parou a descarga do saco 1 e em sentido contrário a da descarga do saco 1. Esse processo foi realizado até que todo o material fosse distribuído na pilha.



(a)

(b)

Figura 4.1 Homogeneização das amostras

Ao final da homogeneização da amostra, foram formados três lotes contendo aproximadamente 60 kg e o material restante foi guardado para a obtenção dos dados iniciais do estudo de envelhecimento, servindo como base de comparação. No total foram separados 8 lotes de pelotas, dentre os quais de 6 foram usadas para a estocagem e 2 para a caracterização inicial das amostras. As amostras que foram separadas para a exposição não sofreram nenhum processo de classificação, sendo estocadas tal como chegaram.

#### 4.1 Exposições das amostras

A partir dos 6 lotes formados, iniciou-se o estudo de envelhecimento no dia 12 de março de 2012. Foi colocado um lote de cada amostra em uma determinada condição:

- uma área aberta próxima do LTM/UFRJ/COPPE (Figura 4.2a),
- uma área coberta também próxima ao LTM/UFRJ/COPPE (Figura 4.2b) e
- uma câmara úmida no Laboratório de Estruturas/UFRJ/COPPE (Figura 4.3).



Figura 4.2 Exposição em área aberta (a) e área coberta (b)



Figura 4.3 Exposição em câmara úmida (LabEst/UFRJ/COPPE)

Essas três condições foram escolhidas para melhor reproduzir o que acontece com a pilha estocada em pátio. As amostras em câmara úmida têm por objetivo demonstrar o

que acontece com a base da pilha, visto que nos pátios de estocagem há um acúmulo de água na base da pilha, onde as pelotas devem estar sujeitas à umidade saturada. Assim, a câmara úmida foi escolhida por apresentar umidade de  $\pm 99\%$  e temperatura de  $\pm 25^\circ \text{C}$ .

As amostras foram expostas em pátio coberto com o objetivo representar o efeito do envelhecimento no interior da pilha, onde as variações climáticas não afetam diretamente devido as camadas superficiais. As amostras ficaram expostas de forma que na ocorrência de chuva não houvesse contato direto com as mesmas, assim como não havia exposição direta ao sol.

As amostras que ficaram em pátio aberto sofreram o efeito de todo tipo de variação climática. Apenas para evitar a contaminação por corpos estranhos, elas foram apenas protegidas com uma tela (Figura 4.3a). Essas amostras foram expostas a condições que visaram simular o que ocorre com o material contido na parte externa da pilha.

Tendo em vista que, embora raro, a estocagem de pelotas em pátios pode chegar a ocorrer por períodos prolongados, decidiu-se que o estudo teria uma duração de 6 meses, com amostragens a cada 15 dias nos três primeiros meses e a partir do terceiro mês as amostragens seriam realizadas a cada 30 dias. Esse período de amostragem foi determinado a partir de estudos preliminares que apontaram efeitos significativos apenas após 15 dias de exposição e após um período de 50 dias os efeitos apresentaram ser menos expressivos (MARTINS e TAVARES, 2011).

Infelizmente, o estudo não permitiu analisar a ocorrência de quebra espontânea de pelotas durante a exposição, tendo em vista que os finos e os fragmentos gerados durante a exposição não foram recuperados.

A exposição foi iniciada em 12 de março de 2012 e foi realizado até o dia 29 de outubro de 2012, totalizando 10 amostragens.

## **4.2 Análises**

Paralelamente à colocação das amostras em seus ambientes de exposição, foi também realizada a caracterização do material como recebido.

A medida de teor de umidade foi realizada separando-se 10 pelotas de forma aleatória do lote e pesando-se a sua massa. Em seguida, essas mesmas pelotas foram submetidas à secagem em estufa por 5 horas a uma temperatura de 80° C. Passado esse período as pelotas foram retiradas da estufa e, com elas em temperatura ambiente, a sua massa foi novamente determinada, obtendo-se a umidade do lote.

Em seguida, a distribuição granulométrica foi determinada por peneiramento, enquanto a proporção de cacos e pelotas na amostra foi estimada por inspeção visual. Para isso utilizou-se uma série de peneiras com aberturas entre 19 e 6,3 mm. Passou-se o lote pelas peneiras e determinou-se a proporção de material retido em cada uma. A partir do material retido foram separados os cacos e as pelotas, conforme ilustra a figura 4.4.



Figura 4.4 (a) Pelotas e (b) Cacos

Com as pelotas separadas em classes, foram utilizadas apenas pelotas na faixa de 12,5 x 9,00 mm para montagem de lotes para os ensaios de compressão, impactos repetidos e tamboramento.

O ensaio de compressão foi realizado conforme a ISO 4700: 1996 (Pelotas de Minério de Ferro – Determinação da resistência à compressão) utilizamos um lote com 100 pelotas escolhidas aleatoriamente e submetemos cada pelota, individualmente, à compressão lenta, com velocidade de 10 mm/min. A célula de carga utilizada foi de 10 kN da marca EMIC, modelo DL 1000 (Figura 4.5). Antes de colocar a pelota no prato de compressão, especialmente projetado, seu diâmetro era medido a partir do qual a massa da pelota era estimada. Ao final do ensaio, as distribuições de forças de ruptura, em kgf, e de energias específicas de fratura, em J/kg, eram obtidas.



Figura 4.5 Equipamento de Compressão EMIC com capacidade 10kN

O ensaio de fratura por impactos repetidos consistiu em impactar individualmente cada pelota com uma energia específica até que ocorra um evento de quebra ou em um máximo de 40 impactos, em um equipamento de queda de peso (Figura 4.6). Para a realização desse ensaio foram utilizados dois lotes com 100 pelotas por amostra, escolhidas aleatoriamente, e a energia específica utilizada foi 180 J/kg e 90 J/kg. Os dois lotes de cada amostra tinham suas massas balanceadas, com variação apenas no centenário de grama entre os lotes. Relacionando a massa do lote com a energia específica desejada e a massa do impactor (Figura 4.6) era estimada a altura na qual o impactor deveria permanecer em repouso de modo que sua queda proporcionasse à partícula a energia específica desejada. Somente após essa determinação era iniciado o ensaio, sendo cada pelota impactada apenas uma vez. Após o primeiro impacto em todas as partículas contidas em cada lote, separaram-se os finos gerados e as pelotas fragmentadas por essa primeira etapa. Assim, as pelotas que quebravam no primeiro impacto eram separadas, para análise granulométrica posterior, enquanto as que não quebravam eram submetidas, repetidamente, a impactos até que ocorresse quebra ou até um máximo de 40 impactos. O resultado desse ensaio indica o comportamento de quebra das pelotas devido a diversas quedas, como as que ocorrem durante o transporte e manuseio.

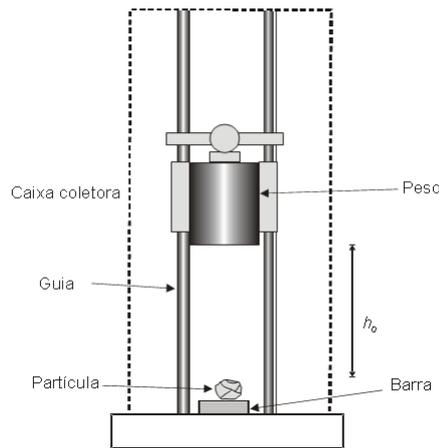


Figura 4.6 Célula de carga de impacto COPPE de 63 mm

Para a realização do ensaio de tamboramento foram utilizados dois lotes contendo cada um 80 pelotas, escolhidas aleatoriamente, sendo a massa dos lotes balanceada. Dessa forma, o ensaio de tamboramento não segue o padrão recomendado pela ISO, sendo um ensaio proposto no LTM com o objetivo de analisar a fragmentação de pelotas como resultado de impactos de baixa energia. Através de simulação no software EDEM determinou-se que, para o moinho disponível no LTM/COPPE/UFRJ (Figura 4.7), a quantidade ideal dentro do moinho seria 80 pelotas, visto que essa quantidade permite minimizar a interação entre as partículas e seu impacto diretamente contra a superfície interna do equipamento.

Assim, esse ensaio permite avaliar a geração de finos por impactos de baixa energia (abrasão ou fragmentação superficial) com a chapa de aço e não de pelota com pelota, o que ocorreria caso a quantidade de pelotas fosse maior. A frequência ótima de rotações por minuto do moinho, também foi determinado por EDEM, foi de 12,7 rpm. Para uma melhor avaliação do ensaio de abrasão utilizou-se a seguinte metodologia: um lote da amostra era pesado e colocado dentro do moinho e o tamboramento ocorria por 1 minuto, transcorrido esse período a amostra era retirada. O excesso de finos na superfície era retirado através de sopragem e então o lote era repesado. Em seguida da pesagem o lote voltava para o moinho e era tamborado por mais 2 minutos, totalizando 3 minutos de tamboramento. Nesse momento o lote era retirado e os finos superficiais eram soprados, repesados, sendo esse processo repetido até que o tempo total de tamboramento fosse igual a 9 minutos. A partir das massas obtidas, calculou-se a perda mássica por minuto do lote e a perda mássica por impacto do lote. Para uma melhor

determinação da massa perdida, a massa do lote era pesada três vezes e, a partir dos valores obtidos, era calculada a média da massa pós tamboramento e, com o valor dessa média era estimada a perda mássica por pelota e por tempo. O resultado do ensaio é o índice de fragmentação superficial, que corresponde à percentagem de finos gerados por impacto e por pelota no interior do tambor.



Figura 4.7 Moinho de tamboramento LTM/COPPE/UFRJ

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1. Caracterização das amostras como recebidas

A caracterização das amostras foi realizada de maneira a obter dados que servissem de base de comparação com aqueles que seriam obtidos posteriormente com os materiais amostrados da exposição. Os ensaios foram realizados com as pelotas tal como foram recebidas, sendo que a tabela 1 compara os resultados obtidos para os dois tipos de pelotas. A tabela também compara alguns resultados obtidos pela usina pelletizadora imediatamente após a produção àqueles obtidos no Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM). As pelotas para alto forno (PAF) chegaram com elevado teor de umidade em comparação às pelotas para redução direta (PRD), e apresentando menor resistência ao esmagamento. A resistência à abrasão das pelotas é apresentado por dois índices de tamboramento, que representam análises diferentes do ensaio: um índice corresponde aos ensaios realizados no Laboratório de Tecnologia Mineral e o outro aos ensaios realizados na usina pelletizadora. O tamboramento realizado no Laboratório de Tecnologia Mineral mostrou que as pelotas para alto forno são menos resistentes à abrasão comparadas com as pelotas para redução direta. Enquanto os ensaios de tamboramento realizados na usina pelletizadora mostraram que as duas pelotas, aparentemente, possuem mesmo comportamento abrasivo.

Tabela 1. Comparação entre as pelotas para alto forno (PAF) e as pelotas para redução direta (PRD)

<b>Ensaio</b>	<b>PAF</b>	<b>PRD</b>	<b>Local de realização</b>
<b>Umidade (%)</b>	1,04	0,15	LTM
<b>Força de ruptura média (kgf)</b>	247	282	LTM
<b>Força de ruptura média (kgf)</b>	300	330	Usina Pelotizadora
<b>Energia específica mediana (J/kg)</b>	191	230	LTM
<b>Proporção de pelotas com força de ruptura média inferior a 200 kgf (%)</b>	30	17	LTM
<b>Índice de fragmentação superficial (%)</b>	0,0244	0,0154	LTM
<b>Índice de tamboramento (%)</b>	94	94,2	Usina Pelotizadora

Na tabela 1 pode-se observar uma diferença entre a força de ruptura média obtida na usina pelletizadora e no LTM. Os ensaios de compressão na usina pelletizadora foram realizados logo após a produção das pelotas, enquanto os ensaios no LTM só puderam ser realizados após 20 dias da produção das pelotas devido à logística de envio e entrega do material. Esse período entre a produção e a realização do ensaio no LTM, e a umidade presente nas pelotas pode explicar a diferença na resistência das pelotas, assim como foi sugerido por FONSECA (2003). Essas diferenças podem estar associadas, por outro lado, às diferenças ocasionadas pela aleatoriedade na seleção das pelotas para o ensaio.

Analisando apenas os dados obtidos no Laboratório de Tecnologia Mineral, pode-se dizer que as pelotas para alto forno chegaram apresentando maior tendência a degradação que as pelotas para redução direta. Também pode-se comprovar a diferença de comportamento mecânico entre as pelotas produzidas para diferentes processos de redução.

## **5.2. Ensaio de envelhecimento**

### **5.2.1. Variação das condições ambientais**

Partindo da premissa que as condições ambientais às quais pelotas são sujeitas têm um impacto direto na sua degradação, são analisados inicialmente, os resultados de variação das condições climáticas ao longo dos 232 dias de exposição das amostras. A coleta de dados foi, inicialmente, realizada no LTM com a utilização de equipamentos de uso doméstico, sendo os dados coletados sempre no mesmo horário, às 12 h. No entanto, os dados não eram coletados aos fins de semana e feriados, criando uma descontinuidade nessa base de informação.

Paralelamente com a coleta de dados no LTM, foram registrados os dados fornecidos pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) de uma estação meteorológica localizada na Ilha do Governador ([www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br)). Esses dados do site do INMET também foram coletados diariamente, tanto para a temperatura quanto a umidade, ambas medidas às 12 h, enquanto os dados pluviométricos são relativos à precipitação de chuvas em 24 h. A partir da comparação entre os dois conjuntos de

dados (Figura 5.1), conclui-se que os dados fornecidos pelo INMET eram confiáveis e que poderiam ser utilizados como uma forma de controle do envelhecimento.

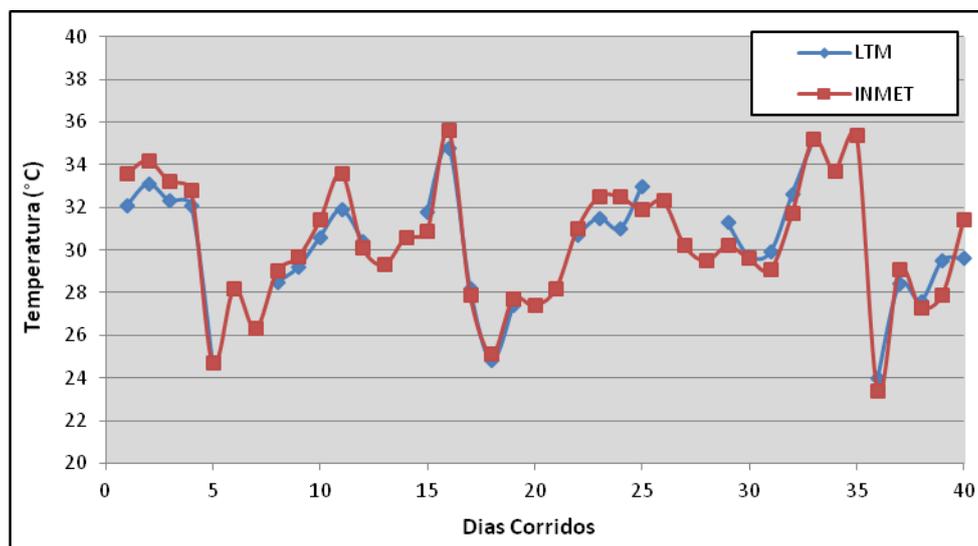


Figura 5.1 Relação entre os dados obtidos no LTM e os fornecidos pelo site INMET

As figuras 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam, respectivamente, os índices pluviométricos, as temperaturas e valores de umidade relativa do ar, durante os 232 dias de exposição, todos fornecidos pelo INMET. Esses dados poderão ser utilizados posteriormente para explicar possíveis mudanças de comportamento das pelotas estocadas. É importante destacar que esses dados são relevantes apenas para o caso das pelotas que ficaram estocadas em pátio aberto (PA) e pátio coberto (PC), pois as pelotas que ficaram em câmara úmida (CA) estavam sujeitas à temperatura e umidade constantes. As linhas verticais em azul representam os dias de amostragens e servem de auxílio para verificação das condições nos dias da amostragem.

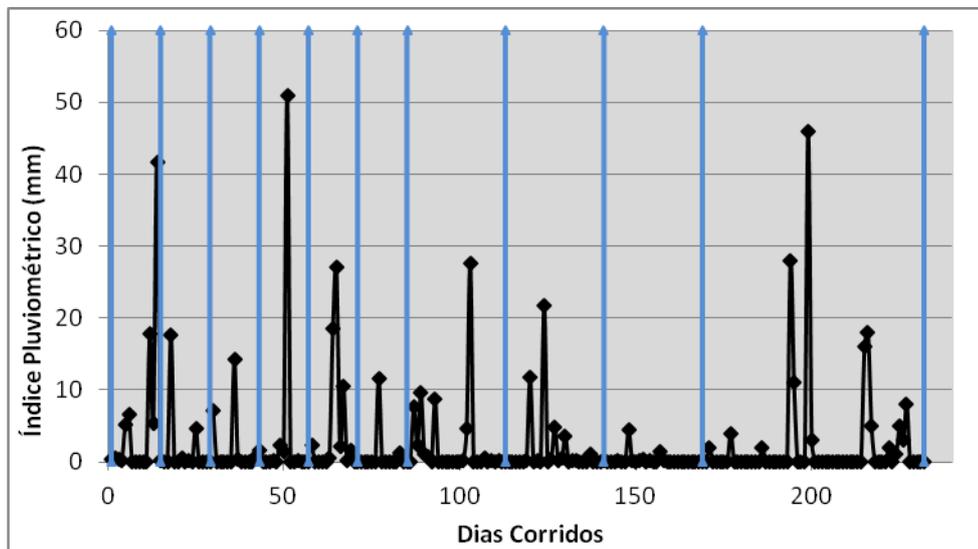


Figura 5.2 Índice pluviométrico diário (Fonte: INMET).

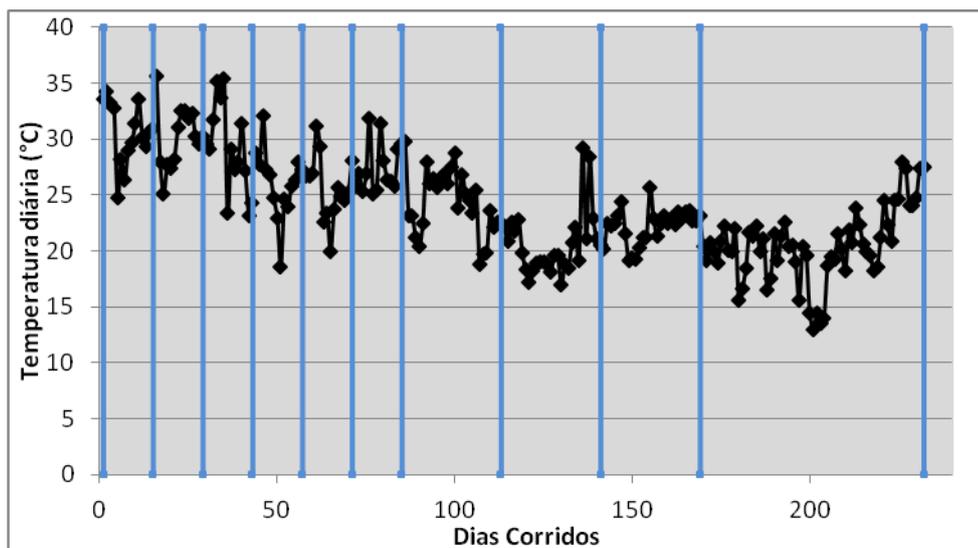


Figura 5.3 Temperatura diária, medida às 12 h (Fonte: INMET).

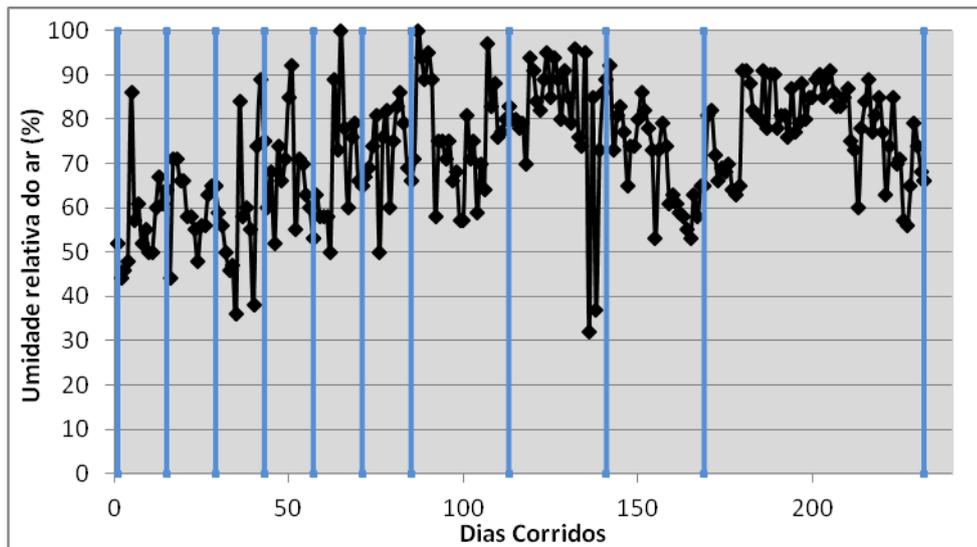


Figura 5.4 Umidade relativa do ar diária, medida às 12 h (Fonte: INMET).

### 5.3 Umidade

O teor de umidade das pelotas foi medido com o objetivo de verificar se a umidade presente nas pelotas exerce alguma influência na sua resistência. Pode-se observar que ambos os tipos de pelotas estocadas em câmara úmida apresentaram elevação da sua umidade interna. A figura 5.5 mostra que as pelotas que ficaram em pátio aberto, apresentaram aumento de umidade apenas na amostragem do dia 43. No dia dessa amostragem houve precipitação de chuvas durante a amostragem, o que resultou nessa umidade elevada, em ambas as pelotas amostradas em pátio aberto. Por outro lado, as pelotas que ficaram em pátio coberto efetivamente secaram, perdendo umidade, de maneira que pode-se concluir que as chuvas não influenciaram diretamente a umidade das pelotas que ficam no interior da pilha.

É importante observar que as pelotas perderam umidade em 15 dias de estocagem, tanto aquelas que ficaram em pátio aberto quanto as que ficaram em pátio coberto. As pelotas estocadas em pátio coberto não absorveram umidade durante os períodos chuvosos, permanecendo com umidade muito próxima de zero. Assim, conclui-se que as pelotas que ficam na superfície e as que ficam na parte mais interna das pilhas perdem igualmente a umidade durante o tempo de estocagem.

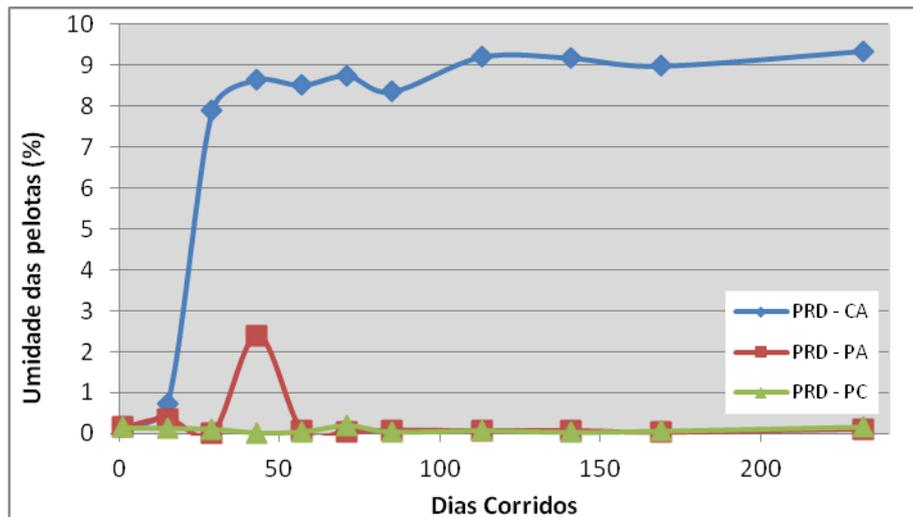


Figura 5.5 Umidade das pelotas para redução direta nos dias da amostragem

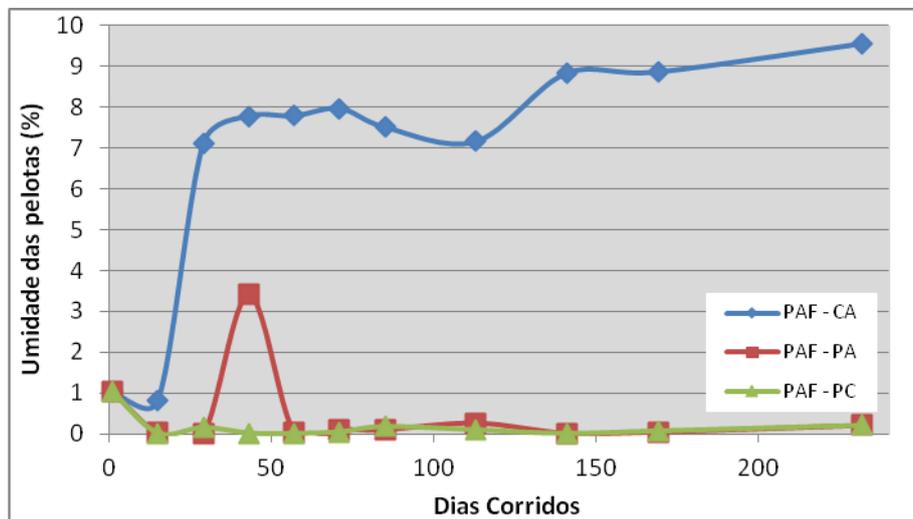


Figura 5.6 Umidade das pelotas para alto forno nos dias da amostragem

#### 5.4 Resistência à compressão e energia de fratura

Os ensaios de compressão foram realizados com as pelotas como amostradas, isso é, com a umidade interna das pelotas. Os ensaios mostraram que as pelotas para redução direta (PRD) que ficaram estocadas em condições extremas de umidade, ou seja, em câmara úmida, tiveram perdas mais significativas de resistência, fragmentando com uma força média menor que a inicial, enquanto que as pelotas que ficaram estocadas em pátio coberto, praticamente não apresentaram variações de resistência (Figura 5.7). Comparando-se os dois tipos de pelotas, as para alto forno comportaram-se de maneira mais constante, tendo apresentado uma queda de resistência para as pelotas que ficaram

em pátio aberto na amostragem do dia 43 e para as pelotas que ficaram estocadas em câmara úmida após 141 dias de estocagem (Figura 5.8).

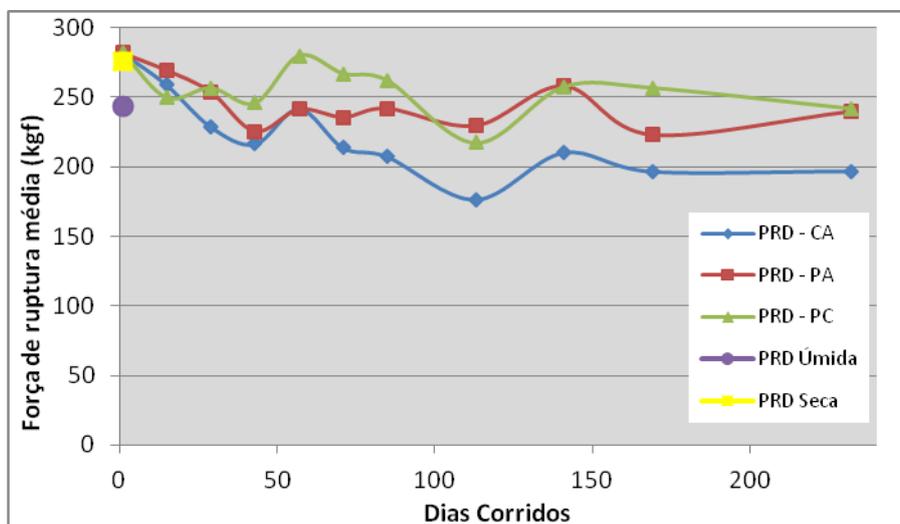


Figura 5.7 Variação da média da resistência à compressão em função dos dias de estocagem das pelotas para redução direta

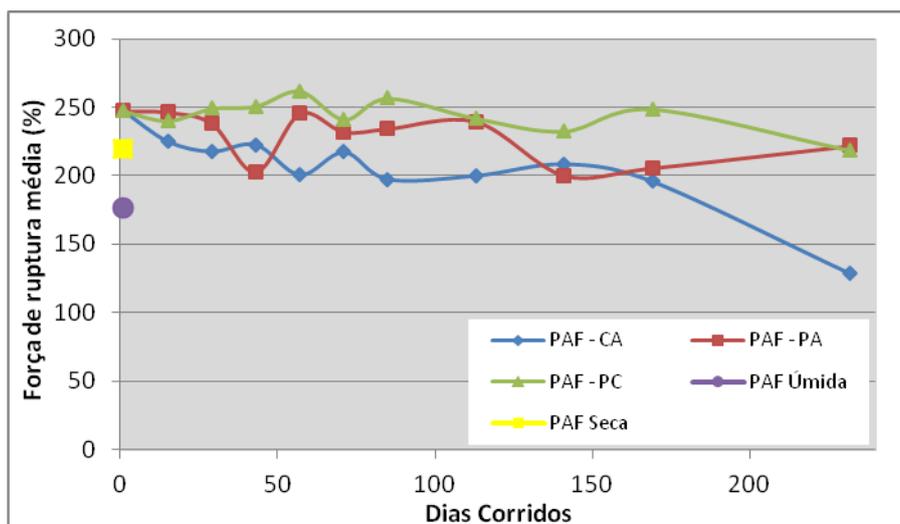


Figura 5.8 Variação da média da resistência à compressão em função dos dias de estocagem das pelotas para alto forno

A fim de avaliar se a variação da umidade contida nas pelotas era o real motivo para a baixa resistência das pelotas sujeitas à câmara úmida, foram realizados ensaios de compressão com as pelotas separadas para a caracterização inicial com diferentes níveis de umidade. Os testes consistiram em verificar se as umidades presentes nas pelotas afetam a resistência à compressão. A tabela 2 apresenta os valores obtidos para as pelotas com a sua umidade inicial, totalmente seca e com elevada umidade. Pode-se verificar através de comparação com o dado obtido para o 1º dia de estocagem que há

perda de resistência nas pelotas úmidas e secas, para ambos os tipos de pelotas, sendo a perda mais efetiva nas pelotas úmidas (Figura 5.7 e 5.8).

Tabela 2. Comparação de resistência das pelotas para diferentes valores de umidade, medidas no LTM.

<b>Amostra</b>	<b>PRD INICIAL</b>	<b>PRD ÚMIDA</b>	<b>PRD SECA</b>
<b>Umidade (%)</b>	0,15	6,37	0,00
<b>Força de ruptura média (kgf)</b>	282,1	243,4	276,0
<b>Proporção de pelotas quebradas com força menor que 200 kgf</b>	18	33	21

<b>Amostra</b>	<b>PAF INICIAL</b>	<b>PAF ÚMIDA</b>	<b>PAF SECA</b>
<b>Umidade (%)</b>	1,04	5,28	0,00
<b>Força de ruptura média (kgf)</b>	247,4	176,4	219,9
<b>Proporção de pelotas quebradas com força menor que 200 kgf</b>	30	62	48

As figuras 5.9 e 5.10 mostram a proporção de pelotas quebradas com força menor que 200 kgf, pode-se observar que as pelotas estocadas em câmara úmida apresentaram menor resistência ao esmagamento ocasionado pelo ensaio de compressão. As pelotas estocadas em pátio coberto comportaram-se de maneira diferente nos dois tipos de pelotas, as para alto forno mantiveram sua proporção de quebra praticamente constante. Enquanto as pelotas para redução direta mantiveram sua proporção sempre superior ao dado inicial indicando perda de resistência à compressão.

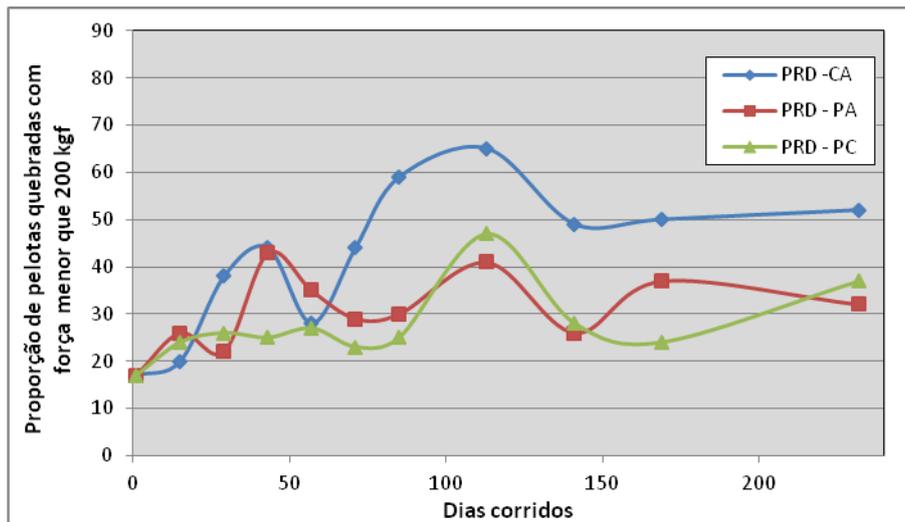


Figura 5.9 Proporção de pelotas quebradas com força menor que 200kgf em função dos dias corridos. Pelotas para redução direta

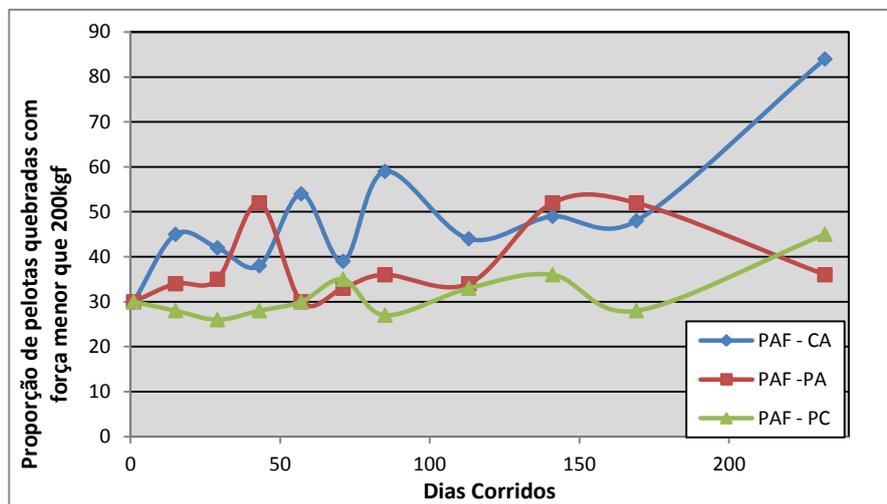


Figura 5.10 Proporção de pelotas quebradas com força menor que 200kgf em função dos dias corridos. Pelotas para alto forno

A energia específica apresentada na Figura 5.11 sugere que a energia necessária para a fratura de pelotas diminui com o tempo de estocagem, sendo também influenciada pela umidade presente nas pelotas para redução direta. O ambiente de exposição mais uma vez fez a diferença no comportamento à degradação das pelotas, sendo os resultados obtidos para a câmara úmida os que demonstraram a redução mais significativa. A Figura 5.12 apresenta os dados de energia para as pelotas para alto forno. Pode-se observar que as pelotas perdem mais rapidamente a resistência à fratura quando expostas na câmara úmida.

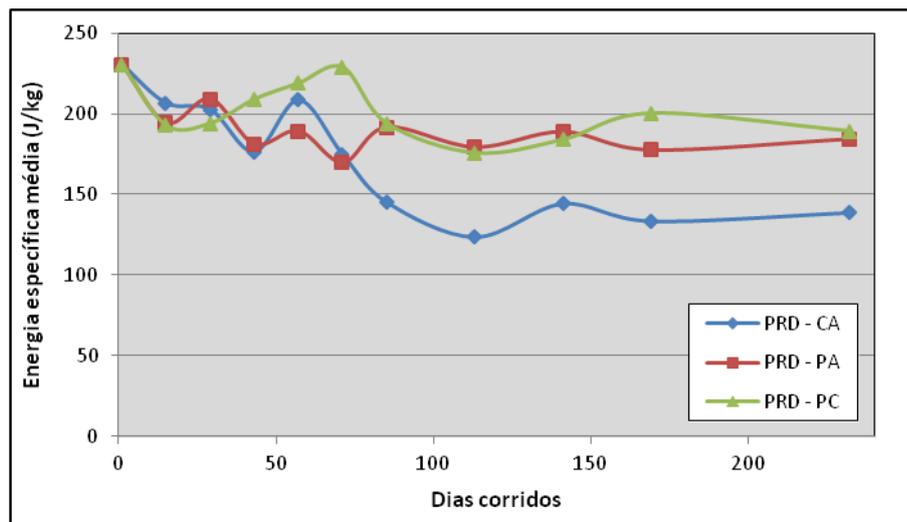


Figura 5.11 Energia específica média (J/kg) para as pelotas para redução direta.

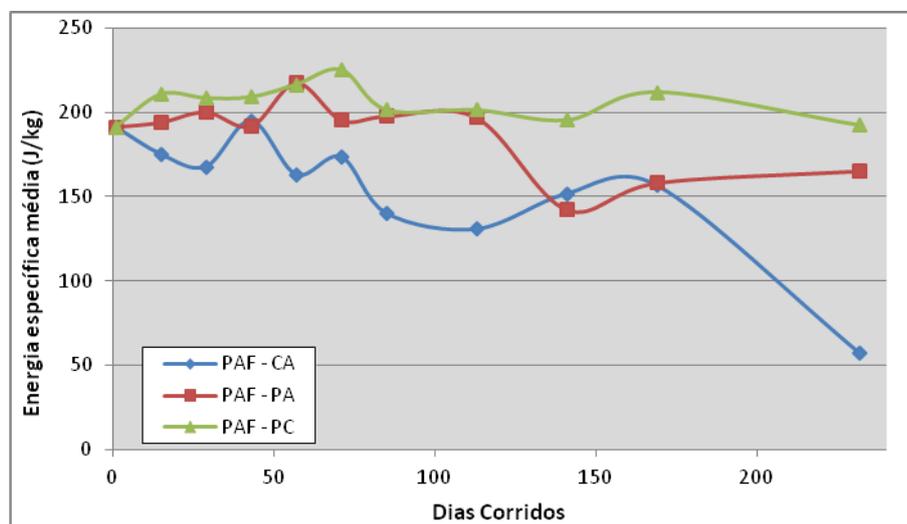


Figura 5.12 Energia específica média (J/kg) para as pelotas para alto forno.

### 5.5 Índice de fragmentação superficial

Os ensaios de fragmentação superficial (abrasão) segundo o padrão LTM foram realizados com a umidade das pelotas tal como coletadas. Os dados obtidos nos ensaios são apresentados nas figuras 5.13 e 5.14, mostrando que não há correlação de comportamento entre os diferentes ambientes de exposições. Além disso, as variações observadas com o tempo de exposição também não foram conclusivas.

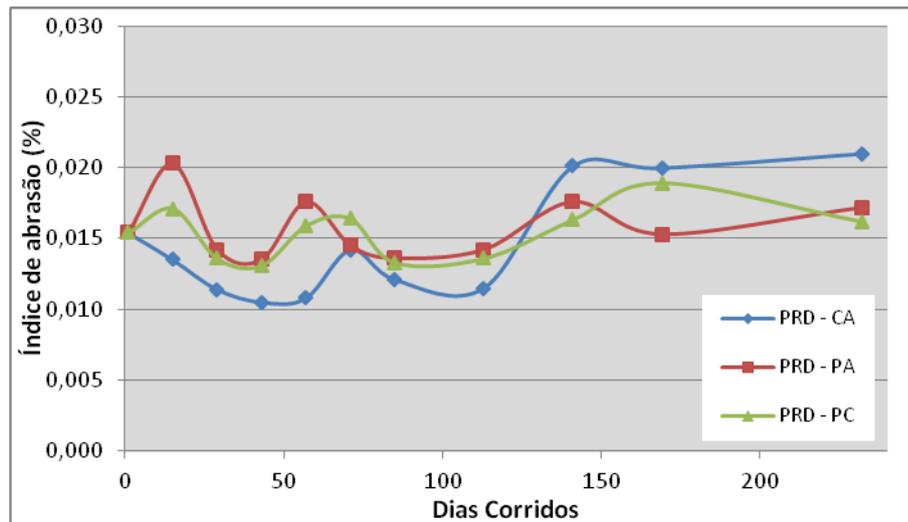


Figura 5.13 Variação do Índice de abrasão (%) em função do tempo de estocagem, pelotas para redução direta

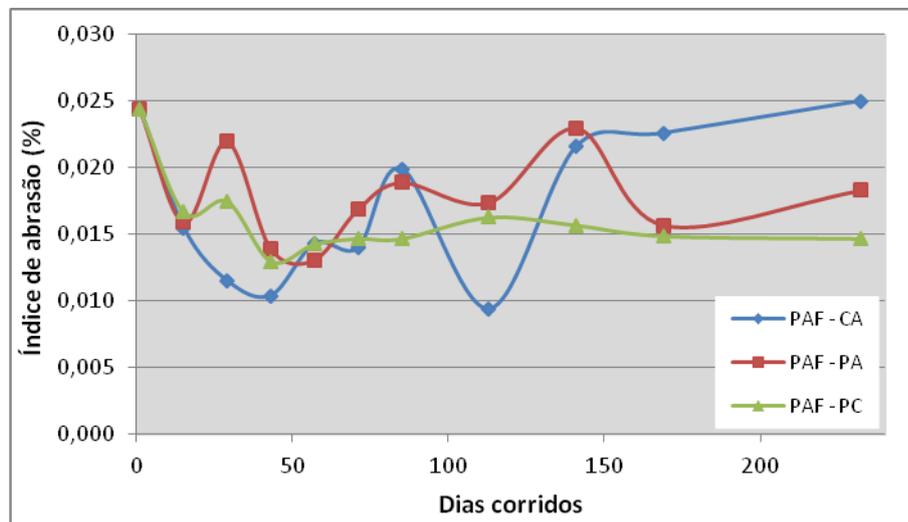


Figura 5.14 Variação do Índice de abrasão (%) em função do tempo de estocagem, pelotas para alto forno

## 5.6 Fratura por impactos repetidos

O ensaio de fratura por impactos repetidos também foi realizado com as amostras como retiradas dos locais de exposição. A figura 5.15 mostra os resultados obtidos para pelotas para redução direta estocadas em câmara úmida, submetidas a impactos repetidos com energia de 90 J/kg. Pode-se observar que há uma ampla variação na resistência ao impacto das pelotas estocadas em câmara úmida, enquanto as pelotas para redução direta estocadas em pátio coberto não apresentaram grandes variações de resistência (Figura 5.16).

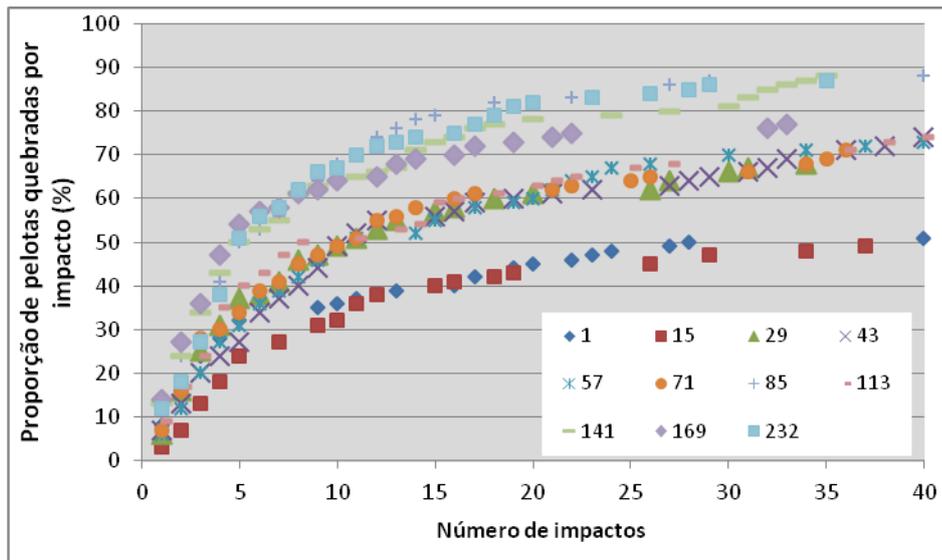


Figura 5.15 Proporção de bolas quebradas por impacto após exposição de bolas para redução direta em câmara úmida por diferentes números de dias. Energia 90 J/kg.

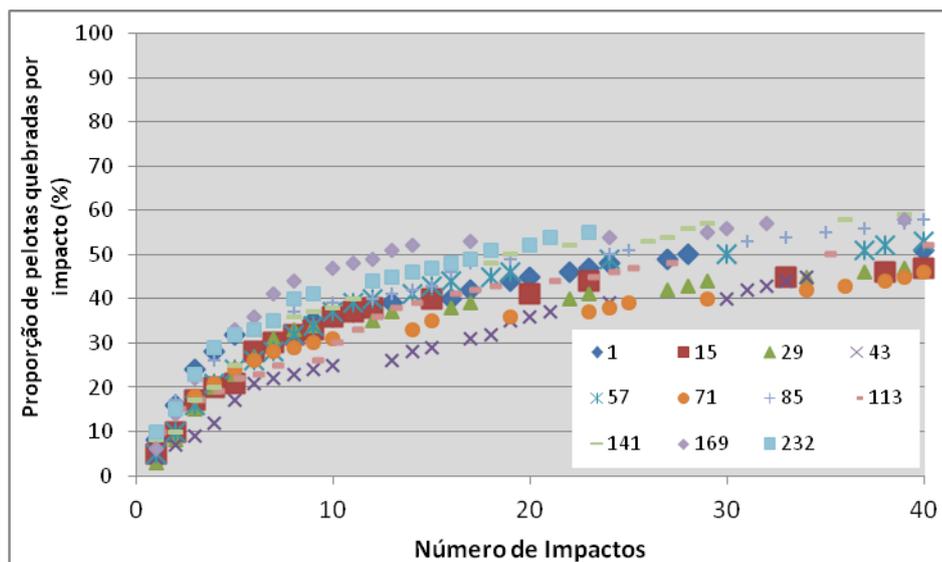


Figura 5.16 Proporção de bolas quebradas por impacto após exposição de bolas para redução direta em pátio coberto por diferentes números de dias. Energia 90 J/kg

Os resultados são apresentados em termos de proporções de bolas quebradas em 10 impactos, para uma determinada energia de impacto. A figura 5.17 mostra que o comportamento de quebra das bolas para uma energia de 180 J/kg, considerada alta, é bem similar em todos os tipos de estocagem para uma mesma bola. Apenas a bola para redução direta, exposta na câmara úmida, apresentou um aumento de resistência na amostragem do dia 57, sem motivos aparentes.

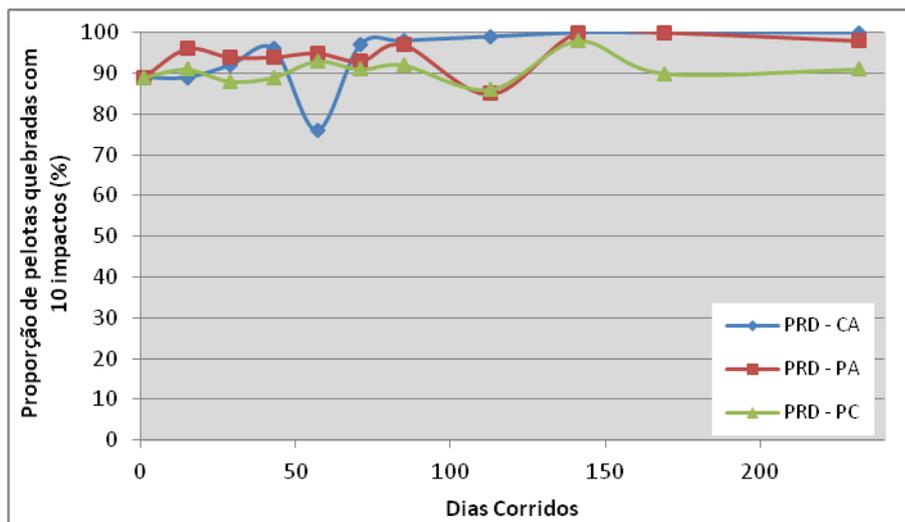


Figura 5.17 Proporção de pelotas quebradas com 10 impactos, com energia aplicada de 180 J/kg para as pelotas para redução direta.

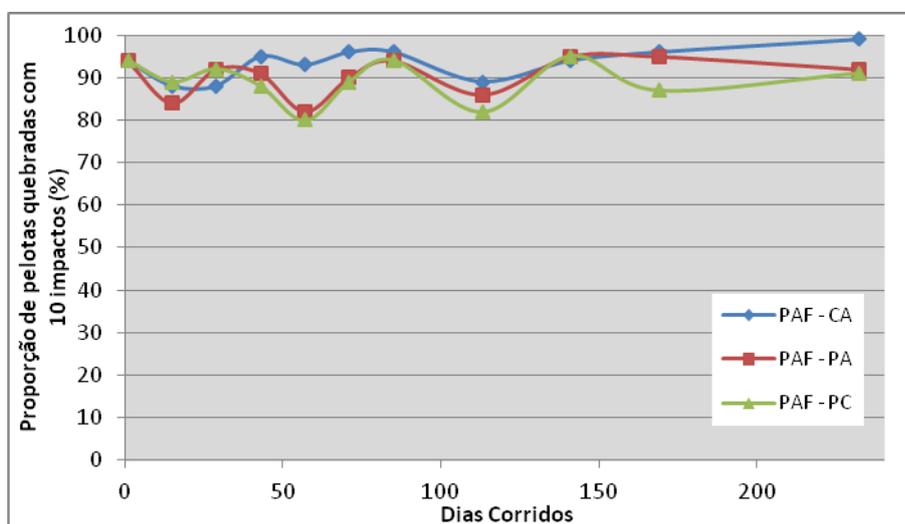


Figura 5.18 Proporção de pelotas quebradas com 10 impactos, com energia aplicada de 180 J/kg para as pelotas para alto forno.

Aplicando-se uma energia mais baixa, de 90 J/kg, obtem-se resultados bem diferentes para a proporção de pelotas quebradas. As pelotas para redução direta estocadas em câmara úmida apresentaram aumento na proporção de quebra com o passar do tempo (Figura 5.19). No entanto, o mesmo efeito não foi observado nas pelotas para alto forno submetidas ao mesmo ambiente. Na realidade, as pelotas para alto forno apresentaram aumento de resistência ao impacto com o período de exposição, apresentando redução de resistência somente após 170 dias de exposição (Figura 5.20).

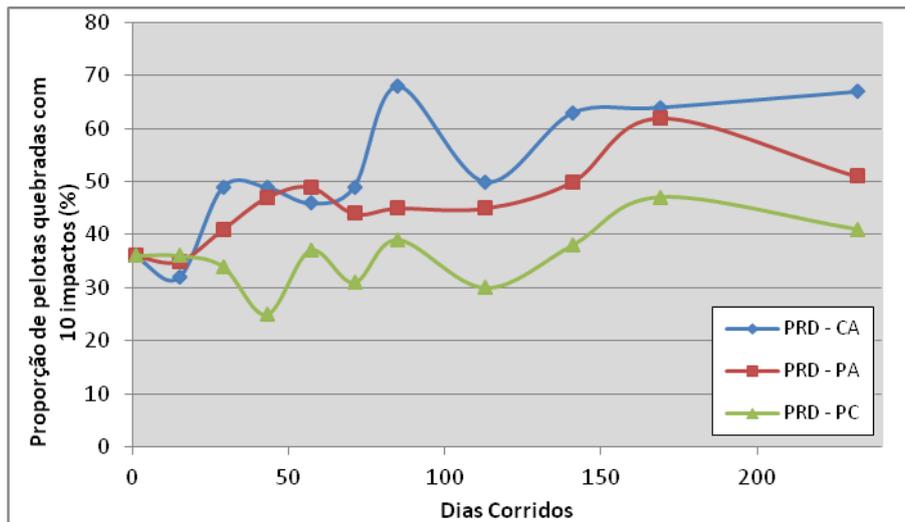


Figura 5.19 Proporção de pelotas quebradas com 10 impactos, com energia aplicada de 90 J/kg para as pelotas para redução direta.

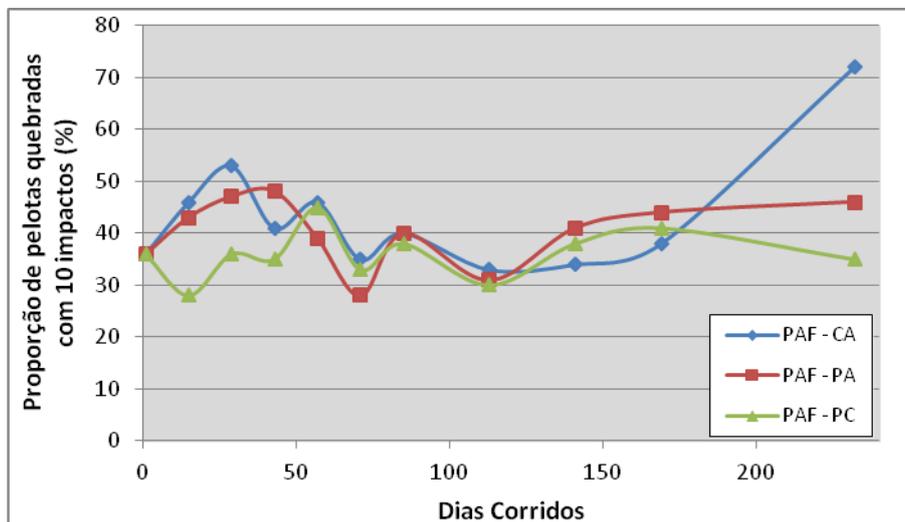


Figura 5.20 Proporção de pelotas quebradas com 10 impactos, com energia aplicada de 90 J/kg para as pelotas para alto forno.

A partir da análise dessas figuras, pode-se afirmar que as pelotas para redução direta são mais susceptíveis ao período de estocagem que as pelotas para alto forno, visto que as pelotas para alto forno mantiveram um comportamento regular nos três ambientes exposição, até 170 dias após o início da exposição.

## 6. Conclusões

Ensaio realizados no Laboratório de Tecnologia Mineral mostraram que as pelotas para alto forno analisadas apresentaram menor resistência à fratura que as pelotas para redução direta.

A análise dos dados obtidos durante as amostragens das pelotas expostas em diferentes condições mostraram que:

- As precipitações de chuvas não alteraram a umidade das pelotas que ficaram em pátio coberto, sugerindo que as pelotas localizadas no interior de uma pilha provavelmente não sofrerão as variações climáticas;
- Pelotas para redução direta sofreram maior perda de resistência mecânica com o tempo de exposição que pelotas para alto forno;
- Há poucas evidências de relação entre a perda de resistência e as variações climáticas;
- Pelotas submetidas a ambientes predominantemente úmidos perdem consideravelmente resistência à compressão;
- A umidade interna das pelotas afeta o comportamento à degradação devido ao manuseio;
- A perda de resistência de pelotas em uma pilha deve ser mais intensa na sua base, sujeita à forte umidade pelo acúmulo de águas de chuvas, seguida da superfície da mesma, sujeita à precipitação e insolação. Pelotas contidas no interior da pilha são, provavelmente, muito pouco prejudicadas pela exposição.

## **7. Proposta para trabalhos futuros**

As sugestões para trabalhos futuros são:

- i. Análise estatística dos dados obtidos;
- ii. Análise micrográfica de alguns fragmentos obtidos durante os ensaios, em cada amostragem.

## 8. Bibliografia

-, *Handbook of extractive metallurgy. Vol 1: The metal industry, ferrous metals*. Editado by Fathi Habashi. Weinheim; Ed: Wiley – VCH. New York, 1997.

ABOUZEID, A. Z. M., SEDDIK, A.A., *Effect of iron ore properties on its balling behaviour*. Powder Technology, vol. 29, pp. 233 – 241, 1981.

ARAÚJO, L. A.; *Manual de Siderurgia*. v 1. Editora Arte & Ciência. São Paulo. 1997.

AZEVEDO, A. C. A., DALMOLIN, R. S. D., *Intemperismo*. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/55283648/Intemperismo-ICS-7cap-2006>, acesso em 25/02/2013, às 20h21min.

CANO, J. M., MARTINEZ, J. J., *Evolução da produção e da qualidade das pelotas de redução direta na Samarco Mineração*. Anais XII Encontro Nacional de Tratamento de Minério e Hidrometalurgia, Rio de Janeiro, Brasil, 1987.

COSTA, R. V. P., *Otimização da resistência à compressão de pelotas de minério de ferro para redução direta pela aplicação de projeto robusto*. 113 páginas. Dissertação de Mestrado, REDEMAT, Ouro Preto, 2008.

FONSECA, V. O., *Envelhecimento de pelotas de minério de ferro com diferentes basicidades e teores de MgO*. 253 páginas, Dissertação de Mestrado, Ouro Preto, 2003.

GIROUX, L., KOLIJN, C. J., PICHELER, F. S., *Storage of small samples of coking coal for thermal rheological tests*. Fuel Processing Technology, 87, 2006, pp. 547 – 561.

GUPTA, R. C., GAUTAM, J. P., *The effect of additives and reductants on the strength of reduced iron ore pellet*. ISIJ International, vol. 43, N° 12, pp.1913 – 1918, 2003.

HECK, N. C., *Redução Carbotérmica (Redutor sólido)*. Disponível em: <http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06632/Redcarb.pdf>, acesso em 08/01/2013, às 14h34min.

HECK, N. C., *Redução direta (Redutor gasoso)*. Disponível em: <http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06632/Reddir.pdf>, acesso em 08/01/2013, às 12h00min.

LITSLER, J. D., WATERS, A. G., NICOL, S. K., *A quantitative measure of coke abrasion*. Transactions ISIJ, vol 26, pp. 704 – 709, 1986.

LITSTER, J. D., WATERS, A. G., NICOL, S. K., *Coke degradation by surface breakage in a modified tumble drum*. Transactions ISIJ, vol 27, pp. 3 – 9, 1987.

MARTINS, M., TAVARES, L. M., *Estudo do envelhecimento na resistência à degradação mecânica de pelotas de minério de ferro*. Painel PEMM, Rio de Janeiro, 2011.

MERKLIN, K. E.; CHILDS, M. H.; *Some factors influencing the physical qualities of iron ore pellets*. AIME, 1961.

MEYER, K., *Pelletizing of iron ores*. Germany: Springer. Verlag Berlim Heidelberg New York, 1980, 302 p.

OLIVEIRA, E. M., *Avaliação da Influência do tempo de estocagem em pilhas na qualidade de carvões metalúrgicos*. 113 páginas. Dissertação de Mestrado, Belo Horizonte, 2008.

SÁ, K. G., COSTA, G. M., VIEIRA, C. B., *Efeito da composição mineralógica na resistência à compressão de pelotas de minério de ferro*. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 18 – 22, 2004.

SAHOO, R., *Degradation characteristics of steel making materials during handling*. Powder Technology, v. 176, pp. 77 – 87, 2007.

SENTELHAS, P. C., ANGELOCCI, L. R. *Umidade do ar, chuva e vento: aula 7*. 2009. Disponível em: <http://www.lce.esalq.usp.br/aulas/lce306/Aula7.pdf>, acesso em 24/02/2013, às 23h40min.

*Siderurgia no Brasil 2010 – 2025: Subsídios para a tomada de decisão* – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Documento Técnico, 112 p, 2010.

TAVARES, L. M., CARVALHO, R. M., *Modeling iron ore degradation during handling*. 2<sup>nd</sup> International Symposium on Iron Ore. São Luís, 2008.

TAVARES, L. M., KING, R. P., *Modeling of particle fracture by repeated impacts using continuum damage mechanics*. Powder Technology, vol. 123, pp. 138 – 146, 2002.

TAVARES, L. M., LIMA, A. S., *Célula de carga de impacto na caracterização de materiais para a cominuição. Parte 2: Fratura de partículas*. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, vol. 59 (2), pp. 165 – 172, 2006.

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, pp. 159 – 184.