

“ENVELHECIMENTO” DO SÍNTER PRODUZIDO NA ARCELORMITTAL MONLEVADE¹

Efrem Martins Ribeiro²
Raimundo Nonato Batista Braga³
Rubens Moreira Bicalho⁴
Aurélio Vieira Leal⁵
Ronildo Carlos Pereira⁶

Resumo

O sinter produzido na ArcelorMittal Monlevade e não consumido imediatamente pelo Alto-forno A (AF-A) é estocado nos pátios e lá permanece por tempo indeterminado. A esse tempo se atribuiu o termo “envelhecimento”, nesta contribuição técnica. Amostras de um mesmo sinter foram expostas ao “envelhecimento” a céu aberto e em silos, sob monitoramento e periodicamente analisadas, durante 18 meses. Posteriormente, para validação dos resultados obtidos com o sinter monitorado, foi amostrado um sinter “envelhecido” no pátio, por período superior a um ano e realizados os mesmos ensaios.

Os resultados obtidos indicam que, à medida que o sinter “envelhece”, até certo tempo, os índices de resistência a frio e a quente melhoram; por sua vez, a redutibilidade tende a piorar. Tais alterações podem ajudar na compreensão de uma mudança de comportamento do alto-forno, quando substituído o sinter oriundo diretamente da sinterização por sinter estocado. Na tentativa de se elucidarem as razões ou os mecanismos que levam a alterações nas propriedades do sinter, também foram realizados ensaios de micrografia.

Palavras-chave: Sinter; Envelhecimento; Qualidade física; Qualidade metalúrgica.

AGING IN SINTER PRODUCED AT ARCELORMITTAL MONLEVADE WORKS

Abstract

The sinter produced at ArcelorMittal Monlevade Works is normally conveyed to the blast furnace. Therefore some sinter is transported to the yard and it is stored for a certain time. However, natural phenomena as aging may occur on sinter during the storage time. Some sinter samples were “aged” in two different situations: in open air and in bins. These sinter samples were monitored and analyzed during 18 months. Some samples of sinter stored at the yard, for more than one year, were collected also. The results showed that after the “aging” the sinter mechanical strength improved and the sinter reducibility index decreased. These results could enhance the knowledge on blast furnace operation in case of using sinter stored in the yards.

Key words: Aging in sinter; Sinter physical parameters; Sinter metallurgical parameters.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Técnico em Mecânica e em Metalurgia. Aluno do 6º Período de Engenharia Metalúrgica. Coordenador Técnico da Sinterização. ArcelorMittal Monlevade.

³ Engenheiro Metalurgista. Mestre em Engenharia Metalúrgica. Consultor de Redução Sênior. ArcelorMittal Monlevade.

⁴ Técnico em Mecânica. Administrador de Empresas. Gerente da Sinterização. ArcelorMittal Monlevade.

⁵ Técnico em Contabilidade e em Metalurgia. Aluno do 3º Período de Recursos Humanos. Supervisor de Operações. Aqua RPS / ArcelorMittal Monlevade.

⁶ Técnico em Contabilidade. Tecnólogo em Meio Ambiente. Supervisor do Laboratório de Matérias-primas. Aqua RPS / ArcelorMittal Monlevade.

1 INTRODUÇÃO

Para manutenção da continuidade operacional da sinterização e do alto-forno, condição indispensável para boa performance desses processos, a formação de estoque e retirada de sínter dos pátios são práticas rotineiras. Independentemente da demanda, na ArcelorMittal Monlevade, a operação da sinterização sempre visa a formação de um estoque de segurança de sínter, visto que sua participação na carga metálica do AF-A é da ordem de 85%.

Assim, diante de qualquer evento que leve à paralisação ou redução de ritmo de um dos processos, o sínter é transportado para o pátio ou de lá retirado, conforme o caso. Salieta-se que no período precedente à implantação do processo *Hybrid Pelletized Sinter* (HPS), foram estocadas mais de 100.000 t de sínter nos pátios (com a expansão da Usina, isso poderá ocorrer novamente). O tempo de permanência do sínter nos pátios, ao qual está se atribuindo o termo “envelhecimento”, varia de acordo com a demanda, sem controle rigoroso, podendo ultrapassar anos.

Na literatura técnica, há referências sobre “envelhecimento” de pelotas de minério de ferro, em experimentos conduzidos pela Samarco Mineração AS.^(1,2) Nesta contribuição técnica são apresentados os índices de qualidade física e metalúrgica do sínter a cada três meses de “envelhecimento”, durante 18 meses.

2 OBJETIVO

Tem-se como objetivo a investigação do efeito do “envelhecimento” na qualidade física e metalúrgica do sínter.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Samarco Mineração SA realizou experimentos para determinação do efeito do “envelhecimento” sobre a resistência das pelotas de minério de ferro.^(1,2)

As Figuras 1 e 2 mostram a estrutura usada e a forma como pelotas produzidas em escala de laboratório foram expostas ao “envelhecimento” a céu aberto, na Usina Ponta Ubu, em Anchieta, ES.



Figura 1. Estrutura utilizada para exposição das pelotas. **Figura 2.** Exposição das pelotas ao envelhecimento.

Nas Figuras 3 e 4, é apresentado o efeito do “envelhecimento” nos principais índices de resistência a frio e a quente das pelotas, para diferentes composições químicas, segundo a Samarco.

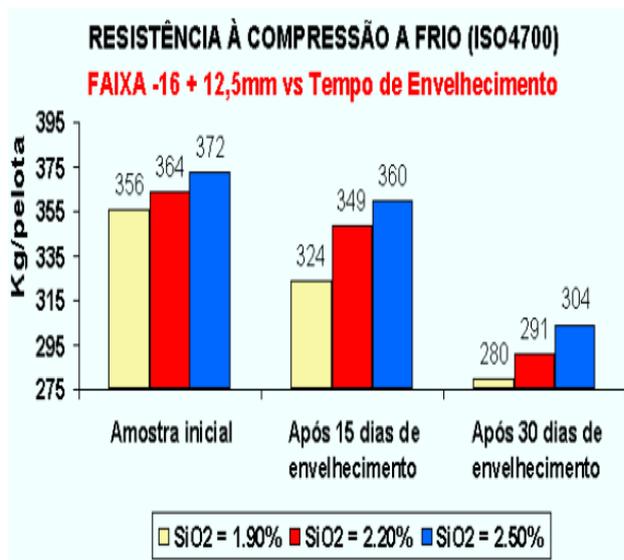


Figura 3. Queda da resistência a frio das pelotas com o envelhecimento.

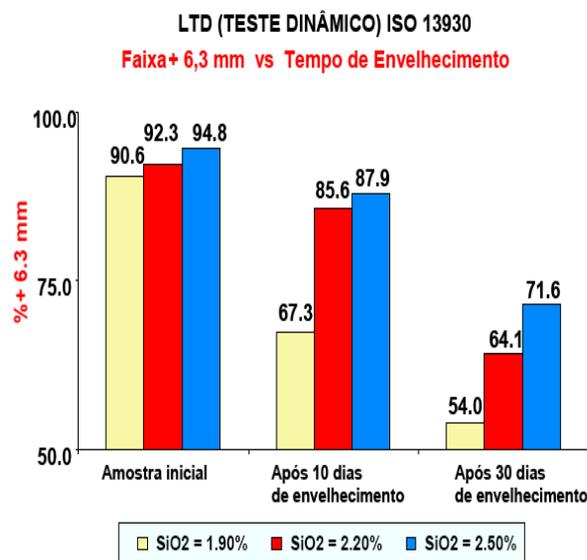


Figura 4. Queda da resistência a quente das pelotas com o envelhecimento.

O impacto do “envelhecimento” na qualidade das pelotas de minério de ferro motivou a realização do presente experimento.

4 PLANEJAMENTO

De acordo com o planejamento, para realização de experimento similar ao das pelotas, amostras de um mesmo sínter, inicialmente caracterizado (conhecido), seriam expostas ao “envelhecimento” (a céu aberto e em silos), durante um ano (quatro estações), sob monitoramento do laboratório. A cada três meses, durante esse período, o sínter seria analisado.

Na Tabela 1 é apresentada uma comparação de tal proposta com o realizado pela Samarco.

Tabela 1. Experimento Samarco x Experimento ArcelorMittal Monlevade

Parâmetro		Experimento	
		Samarco: pelotas	ArcelorMittal Monlevade: sínter
Escala produção		Piloto	Industrial
Exposição das amostras ao “envelhecimento”	A céu aberto	Sobre uma tela metálica suspensa; separadas entre si por uma estrutura metálica.	Diretamente no solo, separadas deste por um tecido plástico (tela fina, utilizada em construção civil) e separadas entre si por grades de madeira. Com esse procedimento permitiu-se a troca de umidade e calor com o solo, sem risco de contaminação
	Em silos	Não publicado	Dentro de tambores de 200 L fechados.
Tempo exposição ao “envelhecimento”		1(2) meses	12 meses (4 estações)
Periodicidade de medição do efeito do “envelhecimento”		A cada 10 (15) dias	A cada 90 dias (3 meses)
Índices medidos (variáveis resposta)		Resistência a compressão a frio e LTD	“Shatter test”, “tumble test” (impacto e abrasão), RDI, redutibilidade, composição química

Durante o período de realização dos testes, conforme planejamento, os índices pluviométricos e temperaturas ambiente foram registrados.

5 EXECUÇÃO

Para avaliação do efeito do “envelhecimento” na qualidade física e metalúrgica, conforme planejado inicialmente, o sínter foi amostrado na sinterização (~ 1.550 kg), de forma contínua, caracterizado e preparadas 20 amostras-padrão para cada tipo de ensaio, as quais foram submetidas ao “envelhecimento” monitorado pelo Laboratório de Matérias-primas.

Na execução, o tempo de exposição ao “envelhecimento” foi estendido para 18 meses, conforme disponibilidade das amostras.

Posteriormente, cumprido o programa inicial dos testes, para validação dos resultados obtidos com o sínter monitorado pelo laboratório, foi amostrado e caracterizado um sínter “envelhecido” no pátio por período supostamente superior a um ano.

5.1 “Envelhecimento” do Sínter Monitorado

Aproveitando-se a disponibilidade de amostras preparadas para cada tipo de ensaio, conforme descrito acima, o experimento se estendeu por tempo além do planejado que era de 12 meses (cobrindo as quatro estações do ano).

As atividades desenvolvidas, desde a amostragem até a caracterização do material “envelhecido” sob monitoramento, estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Atividades desenvolvidas

Atividade	Como	Período	
Amostragem do sínter	Coleta de amostra de forma contínua (~1.550 kg), com a operação da sinterização normal e qualidade do sínter dentro da especificação	Julho de 2008 a outubro de 2009	
Caracterização do sínter	Realização dos ensaios de granulometria, “tumble, shatter”, RDI, redutibilidade e determinação da composição química		
Preparação das amostras de sínter para o “envelhecimento”	Preparação de 20 amostras para cada tipo de ensaio (<i>tumble, shatter</i> , RDI, redutibilidade)		
“Envelhecimento” do sínter a céu aberto	Início		Exposição a céu aberto (pátio laboratório)
	Caracterização periódica		<i>Tumble</i> (ISO 3271), <i>shatter</i> (JIS M8711), RDI (JIS M8720), redutibilidade (JIS M8713). Testes em duplicata, conforme padrões
			RDI (JIS M 8720) e redutibilidade (JIS M8713)
“Envelhecimento” do sínter em silos (tambores 200 L)	Início		Exposição em silos (tambores de 200 L, fechados)
	Caracterização periódica		<i>Tumble</i> (ISO 3271), <i>shatter</i> (JIS M8711), RDI (JIS M 8720), redutibilidade (JIS M8713). Um teste para cada resultado

Nas Figuras 5 e 6 está apresentada a forma como o sínter foi exposto ao “envelhecimento” a céu aberto e em silos, respectivamente.



Figura 5. Exposição do sínter ao envelhecimento a céu aberto.



Figura 6. Exposição do sínter ao envelhecimento em “silo”.

As Figuras 7 e 8 mostram o aspecto do sínter após 12 meses de “envelhecimento”.



Figura 7. Sínter após 12 meses de envelhecimento.



Figura 8. Detalhe das partículas de sínter, envelhecidas.

5.2 Sínter “Envelhecido” no Pátio

As Figuras 9 e 10 mostram o aspecto do sínter, supostamente estocado por mais de um ano, o qual foi amostrado e caracterizado.



Figura 9. Sínter envelhecido no pátio.



Figura 10. Detalhe das partículas de sínter envelhecidas.

As Figuras 11 e 12 apresentam os índices pluviométricos e temperaturas do ar no período de realização do experimento. O ponto de medição está situado nas imediações da Usina.

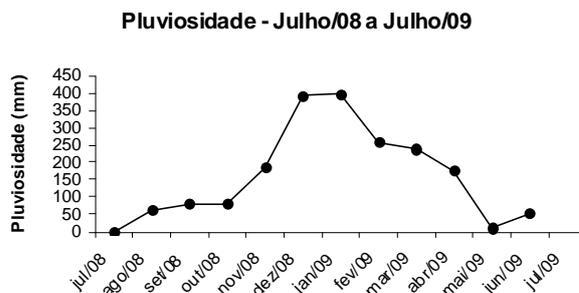


Figura 11. Índices pluviométricos no período de realização do experimento.

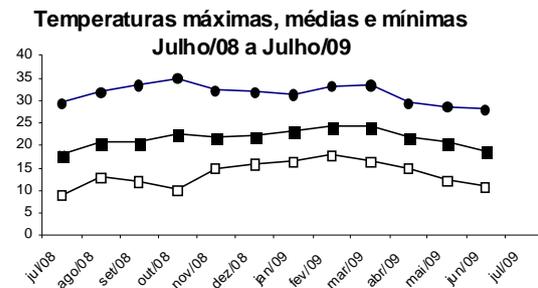


Figura 12. Temperaturas no período de realização do experimento.

6 RESULTADOS

Os resultados apresentados para o sínter “envelhecido” a céu aberto (monitorado) e amostrado no pátio representam a média de dois testes. Para o sínter acondicionado em silos (monitorado), apenas um teste por resultado. Esse menor número de testes objetivou a redução de massa de material manuseada para se garantir maior repetibilidade dos ensaios.

Conforme mencionado, a realização de testes com sínter do pátio, inicialmente não planejada, teve como objetivo a validação dos resultados obtidos nesse experimento.

6.1 “Envelhecimento” do Sínter, Monitorado pelo Laboratório

Na Tabela 3 é apresentada a distribuição granulométrica do sínter (amostrado na sinterização) do qual foram preparadas as amostras submetidas ao “envelhecimento”.

Tabela 3. Granulometria do sínter amostrado na sinterização

Malhas (mm) e % retida									Tamanho médio (mm)	Massa amostra (kg)
50,80	40,00	30,00	25,40	19,05	16,00	9,50	4,76	<4,76		
6,50	4,72	7,23	5,39	12,36	3,92	23,60	28,74	7,55	18,96	1.527,380

Na Tabela 4 está a composição química do sínter, determinada em cada etapa.

Tabela 4 Composição química do sínter ao longo do “envelhecimento”

Etapas		Componentes (%)									
		Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P
Referência		56,90	9,53	5,75	1,59	0,313	9,190	1,37	0,005	0,031	0,054
3 meses	Pátio	57,06	9,70	5,84	1,56	0,322	9,080	1,39	-	-	0,052
	Silo	57,12	9,60	5,76	1,56	0,324	9,170	1,31	-	-	0,050
6 meses	Pátio	57,05	9,86	5,69	1,58	0,327	9,170	1,22	0,002	0,030	0,050
	Silo	57,40	9,46	5,55	1,54	0,338	9,040	1,13	0,002	0,029	0,051
	Referência	56,80	9,81	5,48	1,57	0,317	9,110	1,16	0,001	0,027	0,050
9 meses	Pátio	56,75	9,81	5,60	1,51	0,281	9,210	1,26	0,001	0,027	0,048
	Silo	56,63	10,01	5,58	1,55	0,331	9,160	1,27	0,001	0,0028	0,047
12 meses	Pátio	57,03	10,51	5,67	1,58	0,301	9,230	1,34	0,020	0,032	0,049
	Silo	57,15	9,91	5,69	1,56	0,311	9,310	1,29	0,020	0,032	0,048
15 meses	Pátio	56,85	9,56	5,92	1,58	0,310	9,420	1,60	0,083	0,049	0,049
	Silo	57,15	9,19	5,72	1,54	0,290	9,350	1,44	0,082	0,049	0,048

Na Tabela 5, são apresentados os resultados de qualidade física e metalúrgica do sínter a cada período de “envelhecimento”.

Tabela 5. Qualidade física e metalúrgica do sínter ao longo do “envelhecimento”

“Envelhecimento”		RDI (% < 2,83 mm)	Redutibilidade (Grau de redução, %)	Tumble test		Shatter (% > 9,52 mm)
				Tumble index (% > 6,35 mm)	Abrasão (% < 0,50 mm)	
Inicial	Sint.	25,64	65,39	71,59	6,42	84,045
3 meses	Pátio	20,59	57,12	73,685	6,36	83,835
	Silo	21,20	60,18	72,08	6,48	82,86
6 meses	Pátio	21,06	61,54	74,96	5,72	84,94
	Silo	25,80	63,60	73,07	5,80	83,65
9 meses	Pátio	15,87	65,62	75,785	5,36	85,66
	Silo	19,22	65,40	73,13	6,20	83,95
12 meses	Pátio	17,81	61,26	76,215	6,48	87,95
	Silo	19,25	62,68	73,07	5,56	81,96
15 meses	Pátio	17,57	57,05	76,44	6,39	87,35
	Silo	18,17	64,22	71,76	5,81	80,27
18 meses	Pátio	16,75	54,81	Não realizado	Não realizado	84,85

Na Figura 13, são destacados os índices de resistência a frio (tamboramento e quedas), a quente (RDI) e a redutibilidade do sínter.

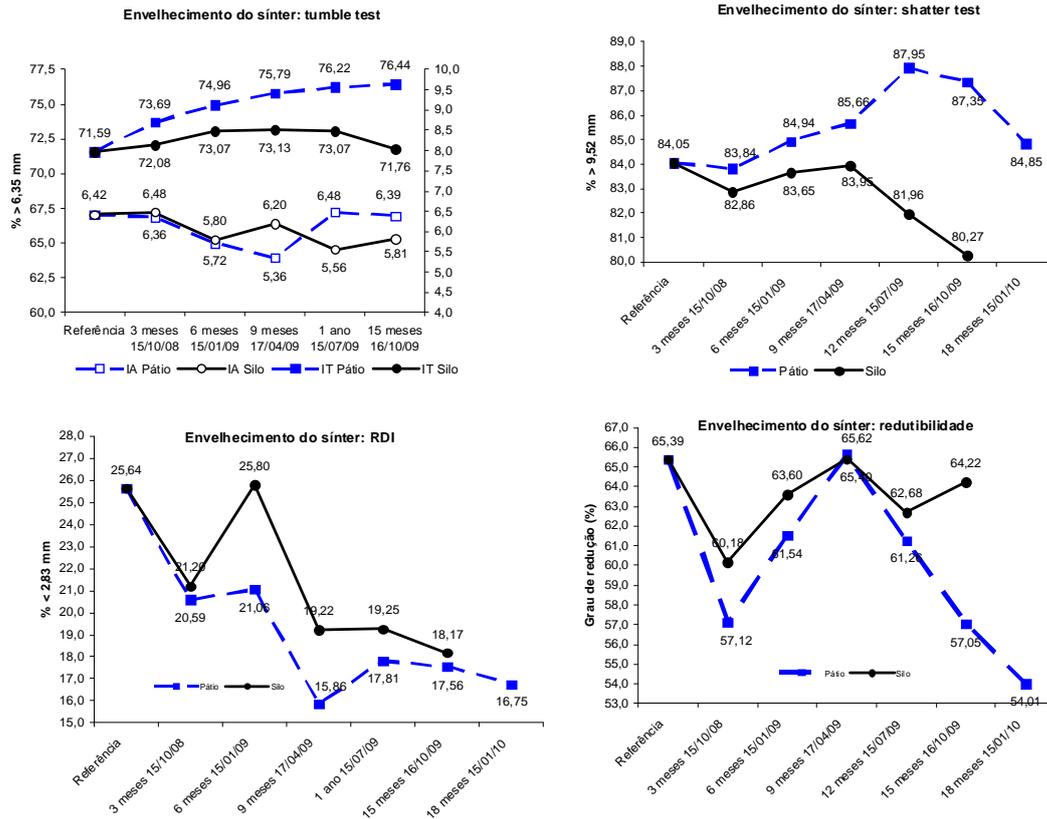


Figura 13. Evolução da resistência a frio do sinter com o envelhecimento.

6.2 Sinter “Envelhecido” no Pátio

Na Tabela 6 é apresentada a distribuição granulométrica de um sinter estocado no pátio por um período superior a um ano e a granulometria média do sinter produzido no ano anterior.

Tabela 6. Granulometria do sinter industrial: média 2008 e obtida no pátio

Identificação	Malhas (mm) e % retida							Mediana (mm)	Tamanho médio (mm)	Umidade (%)
	50,80	25,40	10,00	5,00	4,00	< 4,00	< 5,00			
Referência (média ano anterior)	4,29	18,07	38,53	32,53	1,69	4,89	6,58	12,58	18,82	0,00
Pátio Baú	7,17	21,65	47,37	19,91	1,57	2,33	3,90	16,38	22,58	0,47

Na Tabela 7 é apresentada a composição química do sinter amostrado no “Pátio Baú”.

Tabela 7. Composição química do sinter amostrado no “Pátio Baú”

Componentes (%)										Volume escória (CaO + SiO ₂ , %)	Basicidade Binária (CaO/SiO ₂)	Umidade (%)
Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P			
57,37	7,060	5,56	1,46	0,360	9,42	0,94	0,015	0,025	0,056	14,98	1,69	0,47

A Tabela 8 apresenta os índices de qualidade física e metalúrgica, obtidos com o sínter amostrado no pátio e os valores de referência, considerando os médios mensais do ano anterior. Visando minimizar o erro de amostragem em pilha (que é a forma como está estocado o sínter no pátio), a composição das amostras submetidas ao *shatter test* e ao *tumble test* foi calculada com base na granulometria média do sínter produzido no nesse ano.

Tabela 8. Índices de qualidade física e metalúrgica do sínter amostrado no “Pátio Baú”

Referências	RDI (% < 2,83 mm)	Redutibilidade (Grau de redução, %)	Tumble test		Shatter (% > 9,52 mm)
			Tumble index (% > 6,35 mm)	Abrasão (% < 0,50 mm)	
Mínimo	24,30	59,80	67,30	4,42	83,80
Médio	25,60	61,40	71,80	6,04	86,10
Máximo	27,00	66,00	74,90	7,85	87,60
“Envelhecido”	20,40	62,60	77,30	5,97	92,80

Na Figura 14, são destacados os resultados obtidos com o sínter “envelhecido” no pátio.

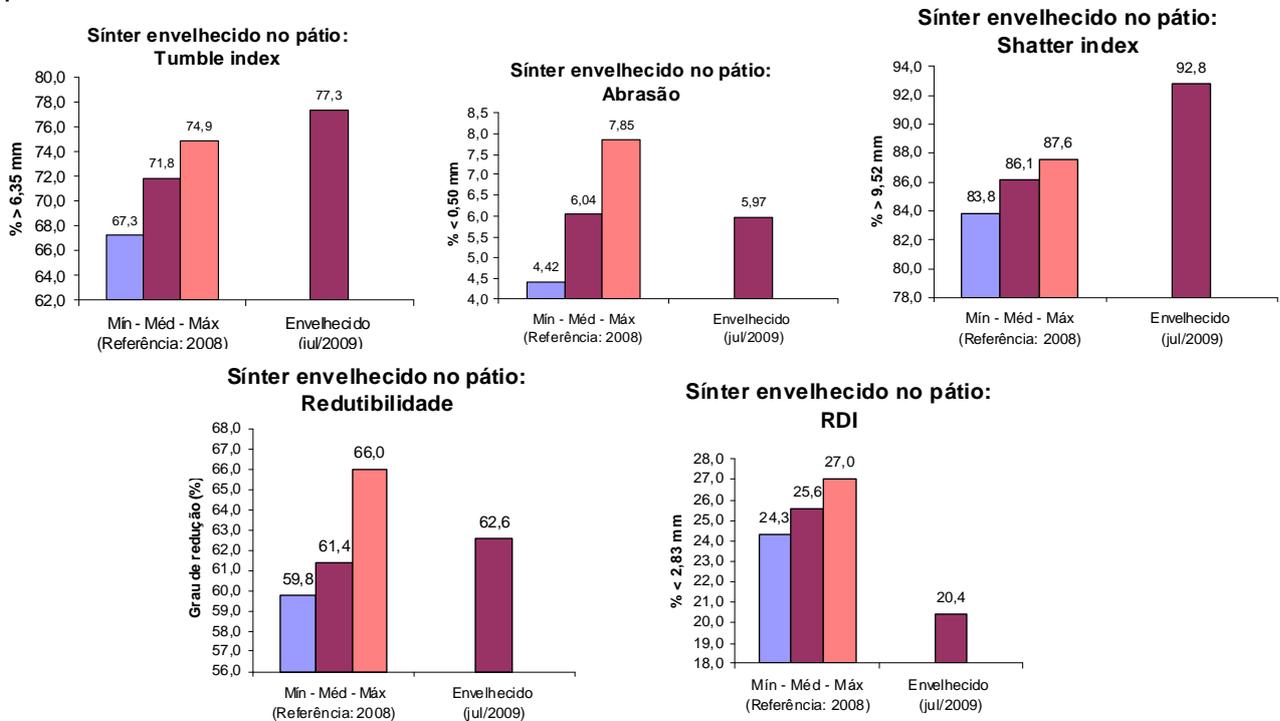


Figura 14. Resultados dos ensaios realizados com sínter “envelhecido” no “Pátio Baú”.

A Figura 15 apresenta o rendimento gasoso no Alto-Forno A, num período em que foi alternado o consumo de sínter diretamente da sinterização e sínter estocado nos pátios.

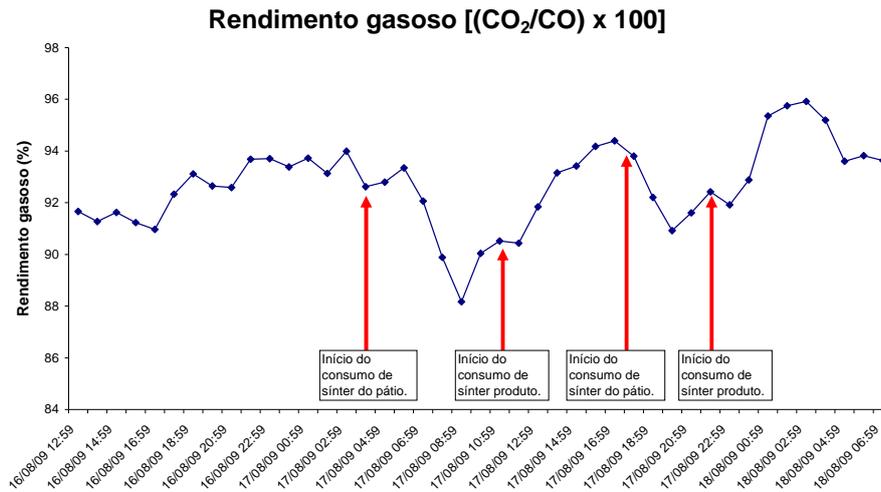


Figura 15. Rendimento gasoso do AF-A com o enformamento de sinter estocado nos pátios.

Com o objetivo de elucidar o mecanismo pelo qual as propriedades do sinter alteram com o seu “envelhecimento”, foram realizados ensaios micrográficos. As Figuras 16 e 17 apresentam a micrografia de um grão de sinter “novo” e de um grão de sinter “envelhecido”, com ampliação de 1.500 x.

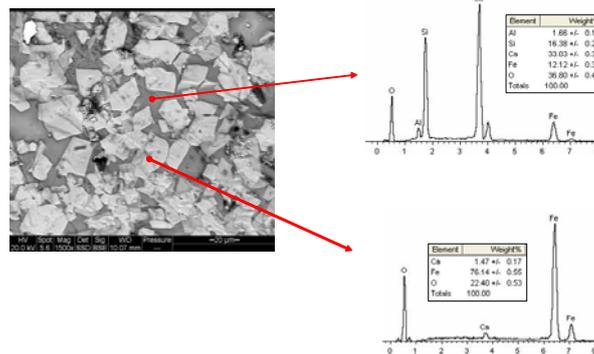


Figura 16. Micrografia de um grão de sinter “novo”.

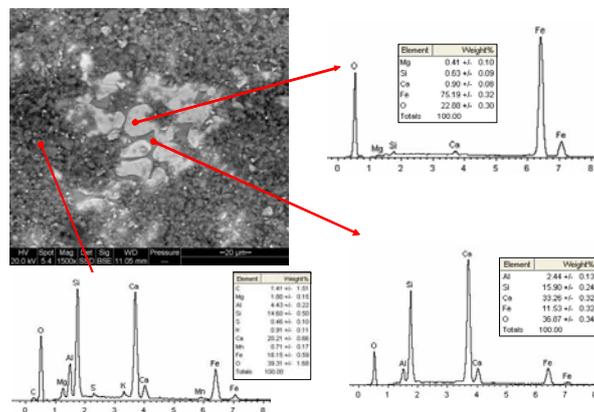


Figura 17. Micrografia de um grão de sinter envelhecido.

7 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADO

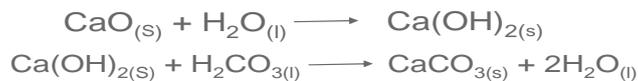
7.1 “Envelhecimento” do Sínter, Monitorado pelo Laboratório

Com base nos resultados apresentados em 18 meses de “envelhecimento”, não foi detectada a estabilização do sínter em termos de qualidade física. Os índices de resistência a frio (*tumble index* e *shatter index*) indicaram uma tendência de elevação, até um certo tempo de “envelhecimento”, seguida de queda. Não se pode afirmar que esse comportamento do sínter difere do apresentado pelas pelotas de minério de ferro^(1,2) visto que os ensaios de compressão e tamboramento medem propriedades distintas.

Quanto à resistência a quente (RDI), a tendência apresentada foi de melhoria com o tempo. Tal comportamento difere daquele apresentado pelas pelotas de minério de ferro,^(1,2) considerando-se a similaridade entre os ensaios de LTD e RDI.

Por sua vez, o grau de redução oscila, tendendo a piorar.

Conforme mostrado através de micrografia, é possível que as alterações nos contornos das fases (passando de pontiagudos para arredondados com o “envelhecimento”) permitam uma maior absorção ou tolerância aos choques, contribuindo para aumentar a resistência. Porém, como explicar a queda dos índices após certo tempo? Por outro lado, as alterações na composição química (elevação da basicidade) também poderiam contribuir para aumento de resistência, mas as possíveis reações levariam a uma redução de CaO e formação de carbonato de cálcio. Em síntese, ocorreria:



Comparando-se a exposição do sínter a “céu aberto” e em “silos”, nota-se uma similaridade entre as curvas apresentadas nas duas situações, indicando o mesmo comportamento diante do tempo, sendo que, em todos os casos, o efeito mais pronunciado foi obtido com a exposição do sínter a “céu aberto”.

Segundo a Samarco, o fenômeno de queda de resistência de pelotas é observado em escala industrial, mas raramente ocorre na mesma proporção em que detectado em seu experimento.⁽²⁾

Como não há, na literatura técnica, referência para “envelhecimento” de sínter, as explicações para os fenômenos ora registrados ainda precisam ser pesquisadas.

7.2 “Envelhecimento” do Sínter: Com Monitoramento x Sem Monitoramento

Os resultados obtidos com o sínter estocado (“envelhecido”) no pátio (sem o monitoramento) corroboraram aqueles obtidos com o sínter “envelhecido” sob monitoramento do laboratório.

7.3 Efeito do Sínter “Envelhecido” na Operação do Alto-Forno

O sínter estocado nos pátios é heterogêneo (não há controle de composição química, granulometria, resistência). De acordo com as evidências apresentadas e opinião de envolvidos na operação do alto-forno, o enforamento desse sínter afeta o ritmo operacional. Nesse caso, supõe-se que a operação estaria ajustada para determinado nível de qualidade de sínter que é diferente daquele do estocado. Vale

ressaltar que os resultados apresentados neste experimento mostraram o impacto do “envelhecimento” na redutibilidade do sinter, quando estocado “a céu aberto”. Segundo Barnaba⁽³⁾ alterações no grau de redução têm efeito marcante na temperatura de início de amolecimento do sinter (no mesmo sentido). Baseando-se nesta afirmação, pode-se esperar um aumento na espessura da zona coesiva com a queda no grau de redução do sinter. Tal constatação é um forte argumento para explicar o efeito negativo do sinter oriundo dos pátios na operação do alto-forno.

8 CONCLUSÃO

Com o “envelhecimento” do sinter, verificou-se:

- elevação da resistência a quente (tendência contrária àquela apresentada por pelotas de minério de ferro) e também a frio, até certo tempo de “envelhecimento”;
- piora na redutibilidade; e
- efeito da exposição a “céu aberto” mais pronunciado que o registrado na exposição dentro de silo.

Os índices apresentados pelo sinter “envelhecido” no pátio (sem monitoramento) confirmaram as tendências registradas no experimento com o sinter, cujo “envelhecimento” foi monitorado pelo laboratório, validando assim o método empregado e resultados obtidos.

Ao mostrar a elevação da resistência física do sinter com o “envelhecimento”, os resultados obtidos neste experimento, se por um lado “tranquilizam”, por outro, trazem preocupação quanto à redutibilidade.

O impacto do “envelhecimento” no grau de redução (e conseqüentemente no ponto de início de amolecimento do sinter) é um importante subsídio técnico para compreensão da mudança de comportamento do alto-forno, quando substituído o sinter oriundo diretamente da sinterização pelo estocado nos pátios.

O mecanismo pelo qual as propriedades do sinter alteram com o seu “envelhecimento” não foi plenamente elucidado; todavia, os resultados ora apresentados atendem ao propósito da área técnica da redução que era o conhecimento, em nível macro, do que ocorre com o material estocado. Novos experimentos deverão ser realizados.

REFERÊNCIAS

- 1 Domingues, R.P., Araújo, D.R., Fonseca, V.O., Otaviano, M.M.; Lopes, F.S., Fonseca, M.C., Costa, R.V.P., Blacut, R.A. Envelhecimento de pelotas de minério de ferro com diferentes teores de sílica, destinadas ao processo de redução em altos-fornos. In: XXXII Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 11., 2002, - ABM, página 173.
- 2 Fonseca, V.O., Wendling, F., Domingues, R.P. Envelhecimento de pelotas de minério de ferro com diferentes basicidades e teores de MgO. In: 59.º Congresso Anual da ABM, Internacional. 7., 2004, São Paulo, SP.
- 3 Barnaba, P. Influência das características químicas nas propriedades de amolecimento e fusão do sinter de minério de ferro. In: Seminário COMIN/COMAP/COEMA da ABM. 9., 1984; Vitória – ES.