



# GRANULAÇÃO DE ESCÓRIA A SECO COM RECUPERAÇÃO DE ENERGIA\*

*Horst Kappes<sup>1</sup>*

*Daniel Michels<sup>2</sup>*

*André Cabral de Oliveira<sup>3</sup>*

*Mário Fernando Gomes de Almeida Cunha<sup>4</sup>*

*Lucas Monteiro da Silva<sup>5</sup>*

*Márcio Mendes Dumont Ferreira<sup>6</sup>*

## Resumo

Tradicionalmente, a escória é descartada em poços secos ou granulada com água, gerando um produto de maior valor agregado devido à vitrificação e consequente aproveitamento na indústria de cimento. Com larga experiência em granulação e mais de 260 referências do sistema INBA<sup>®</sup>, a Paul Wurth agora apresenta a solução mais robusta do mercado para granulação a seco. Promovendo a granulação através da injeção de esferas de aço, comprovou-se, através de uma série de testes, características iguais ou superiores à da escória granulada com água. Uma apresentação desta tecnologia bem como uma narrativa de sua trajetória e os resultados parciais obtidos é descrito neste trabalho.

**Palavras-chave:** Escória; Granulação de escória; Granulação a seco; Energia.

## DRY SLAG GRANULATION WITH ENERGY RECOVERY

### Abstract

Conventionally, metallurgical slag is either cooled in slag pits or granulated in water, generating a product with higher added value due to its vitrification nature and consequent application on the cement industry. With vast experience on slag granulation and more than 260 references of the INBA<sup>®</sup> dewatering system, Paul Wurth now presents the most robust technology for dry slag granulation. Promoting granulation through steel sphere's injection, it was proved through a series of tests equal or better characteristics of this technology comparing to granulation in water. A brief presentation of this technology together with a description of its trajectory and the results obtained so far is described on this paper.

**Keywords:** Slag; Slag granulation; Dry slag granulation; Energy.

<sup>1</sup> RWTH Aachen, Dr.-Ing., Head of Business Area, B.A. Energy and By-Products, Paul Wurth S.A., Luxemburgo.

<sup>2</sup> ETH Zürich, MSc ETH, Process Engineer, B.A. Energy and By-Products, Paul Wurth S.A., Luxemburgo.

<sup>3</sup> Escola técnica federal do Espírito Santo, Analista de Sistemas, Analista de Processos Metalúrgicos, Vendas e Marketing, Paul Wurth do Brasil, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

<sup>4</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Vendas, Vendas e Marketing, Paul Wurth do Brasil, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

<sup>5</sup> Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Engenheiro, Engenheiro de Projetos, Tecnologia, Paul Wurth do Brasil, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

<sup>6</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Vendas, Vendas e Marketing, Paul Wurth do Brasil, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



## 1 INTRODUÇÃO

A escória é um resíduo siderúrgico proveniente das impurezas presentes nos materiais carregados e, no caso do Alto Forno, é composta principalmente por quatro óxidos: CaO, SiO<sub>2</sub>, MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Não obstante, o fato de a produção de escória ser imprescindível para a boa operação dos Fornos é, hoje, um truísmo. Dentre as vantagens relacionadas, destacam-se: proteção contra a oxidação, redução das perdas térmicas e remoção de impurezas indesejadas e que possuem efeitos nefastos no produto final.

Tradicionalmente, a escória era simplesmente despejada em poços secos e deixada para resfriar, com adição ou não de uma ínfima quantidade de água. O resultado era um material de granulometria grosseira e com baixo valor agregado, devido à sua natureza cristalina, não reativa e composta basicamente por uma mistura de silicatos de Ca-Al-Mg.

Com o advento da granulação com água, foi possível obter grãos de escória granulada mais finos e com valor agregado muito superior, uma vez que o resfriamento rápido promove a vitrificação em detrimento da cristalização. Dessa forma, consagrou-se o uso da escória de Alto Forno na indústria de cimento e, a escória até então vista como resíduo, elevou-se a conotação de coproduto.

A substituição de uma parcela de cimento Portland com escória granulada em uma mistura de concreto não apenas deixa o concreto mais resistente, como também contribui para a resistência de compressão, melhora a resistência contra elementos químicos agressivos e diminui a permeabilidade do cimento. De um ponto de vista ambiental, o uso de escória no cimento também serve para deixar o cimento mais “verde”, uma vez que, além de se enquadrar como reciclado, diminui o consumo de energia envolvido na produção das matérias-primas do concreto.

Neste tipo de granulação, a água é primeiramente usada para fragmentar o fluxo de escória e, depois, para remover a energia por contato direto. Como isso tem que ocorrer a pressão ambiente, a temperatura da escória é imediatamente diminuída para abaixo de 100°C, o que torna impossível a recuperação de energia de forma eficiente. Dessa forma, a energia térmica contida na escória é perdida para o ambiente.

Além disto, este tipo de granulação envolve grandes vazões de água e consequentes desperdícios. Adicionalmente, crescentes sanções acerca do uso indiscriminado da água bem como a indisponibilidade dela em certas regiões criam um empecilho para a aplicação da granulação a água em certas regiões ou países.

Portanto, justifica-se a pesquisa e desenvolvimento de uma nova tecnologia de granulação de escória. Não obstante, as propriedades da escória granulada obtidas por esse novo processo devem ser superiores, ou pelo menos iguais, às daquelas atingidas na granulação convencional.

Para se usar o potencial térmico da granulação de forma eficiente, é necessário o resfriamento rápido da escória para uma temperatura suficientemente baixa para facilitar o processamento do material, mas alta o suficiente para preservar a energia em um nível utilizável. Deve-se também atentar para o resfriamento ser rápido e suficiente para promover a vitrificação.

Nesse contexto, a Paul Wurth propôs a mistura da escória líquida com partículas metálicas, p.ex. esferas de aço, a fim de atingir a velocidade de resfriamento desejada e permitir a posterior recuperação de energia. Partículas metálicas também permitem fácil separação por magnetismo e não reagem com a escória.

\* *Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*



Em escala industrial, a escória é vazada para moldes e, subsequentemente, recebe a injeção das partículas metálicas. Os moldes estão conectados entre si na disposição de uma esteira e, logo, o “bolo” formado é transportado até o final, alimentando um trocador de calor.

Através deste, a energia térmica proveniente da mistura escoria/esferas pode ser recuperada e aplicada em diferentes partes da usina. Devido a um acumulador, a troca de calor é contínua, ainda que o processo de granulação seja descontínuo.

Ao final do ciclo, as partículas metálicas são separadas da escória granulada por separação magnética e retornam para o silo de injeção, enquanto a escória segue para a área de estocagem, como indicado na figura 1.

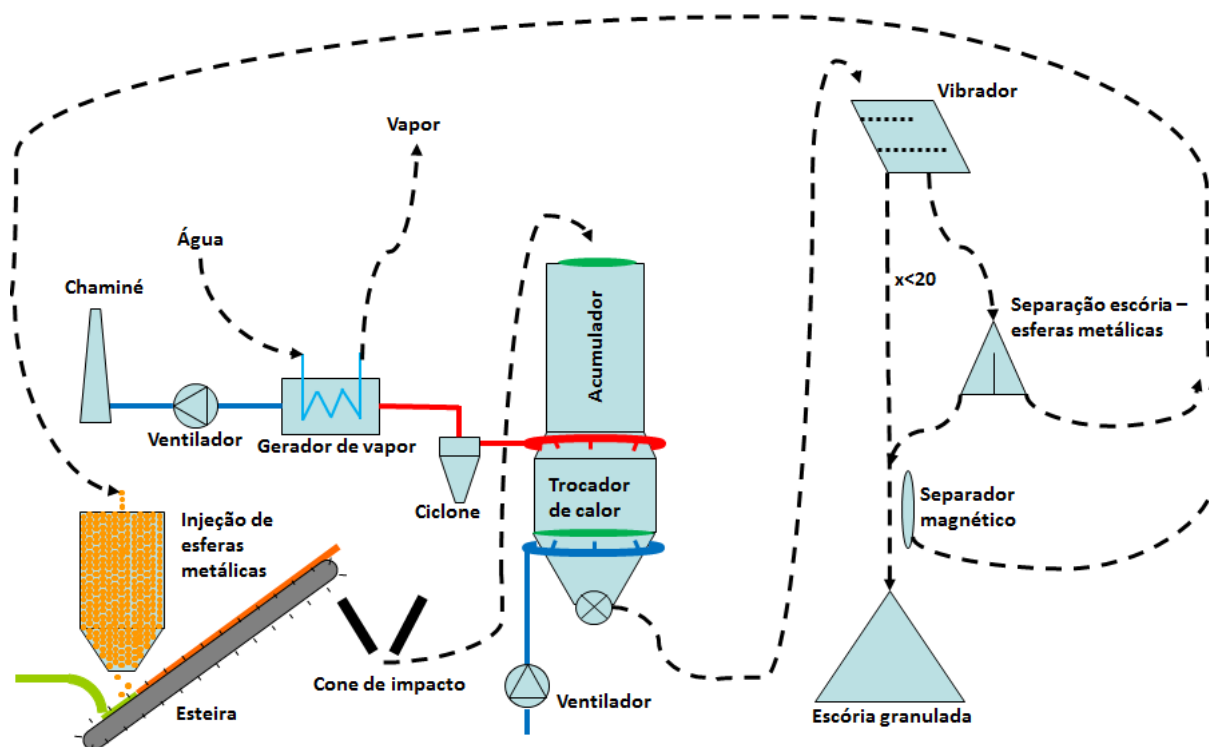


Figura 1 – Fluxograma do processo de granulação a seco Paul Wurth

Em adição à possibilidade de recuperação da energia contida na escória (1800 MJ/t em média para uma composição típica), há ainda notável economia de água (até 800 kg/t de escória), redução nas emissões de enxofre e carbono e custos menores no transporte devido à ausência de umidade residual e maior densidade aparente da escória granulada.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Como um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, após a análise de viabilidade técnica inicial, uma série de testes em escala foi executada com diferentes parâmetros culminando na implantação de uma planta piloto. Esta seção pretende externar o caminho percorrido pela tecnologia até seu estado de desenvolvimento atual.

O período inicial de desenvolvimento foi marcado por cálculos teóricos, modelos matemáticos, cálculos de processo, determinação da geometria das partículas metálicas, determinação do diâmetro máximo da esfera e tempo de residência no

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



molde para atingir a vitrificação, modelos 3D, cálculos estáticos, dimensionamento da esteira transportadora, análises de viabilidade econômica, entre outros.

Dentre as dificuldades técnicas relacionadas às propriedades da escória, destacam-se a baixa condutividade térmica e a alta viscosidade. E, juntamente com o fato de as propriedades serem não homogêneas e dependerem fortemente da temperatura, tem-se um fluido com pobres propriedades dinâmicas.

Os primeiros testes (Figura 2), em 2010, utilizaram baixas quantidades de escória líquida e visavam à confirmação de que o processo proposto era capaz de produzir escória vitrificada, através da simples injeção de esferas metálicas. Com a certificação deste pressuposto, o foco voltou-se para a otimização do corpo metálico responsável pelo resfriamento rápido, geometria e qualidade, e para o padrão de injeção, disposição e quantidade.



**Figura 2** – Testes iniciais da tecnologia

Durante uma série de testes no começo de 2012, testaram-se diferentes tipos de corpos metálicos: cilindros, esferas de diferentes tamanhos, esferas dispostas em diferentes padrões, etc. Na sequência, outra série de testes com maiores capacidades (>200 kg) foram feitas, visando à definição dos moldes industriais.

Um dispositivo simples de teste em pequena escala foi desenvolvido e permitiu o contato desta tecnologia com diversos clientes e diversos tipos de escória. Através deste teste é possível definir o nível de vitrificação obtido e quantificar a energia recuperada. O processo já foi testado com sucesso para as escórias de alto forno, convertedor LD, forno elétrico, ferroníquel (FeNi), dentre outras.

Em Outubro de 2013, a Paul Wurth concluiu a primeira fase do seu projeto de pesquisa e desenvolvimento, ao finalizar a planta piloto de granulação de escoria a seco e o comissionamento a quente da mesma, na Alemanha (Figuras 3 e 4). Com produção estável de 80 toneladas por corrida e fluxo máximo de 6 toneladas por minuto, duas a três corridas semanais tem sido executadas.

\* *Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*



**Figura 3 – Planta industrial da Paul Wurth**



**Figura 4 – Escória líquida no molde e molde após injeção das esferas**

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Via de regra, as amostras geradas foram analisadas pelo Institut für Baustoff-Forschung e.V. (FEhS), um renomado instituto que regularmente analise propriedades da escória para os produtores de aço da Alemanha. A seguir são descritos e discutidos os resultados para os mais importantes parâmetros.

#### 3.1 Composição Química e Densidade

A composição química da escória não é alterada pelo processo de granulação a seco da Paul Wurth e segue solenemente a operação do alto forno. Em relação a densidade aparente, determinou-se sua considerável superioridade em relação à granulação com água ( $1,5 \text{ m}^3/\text{t}$  em comparação com  $1,15 \text{ t/m}^3$ ).

\* *Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

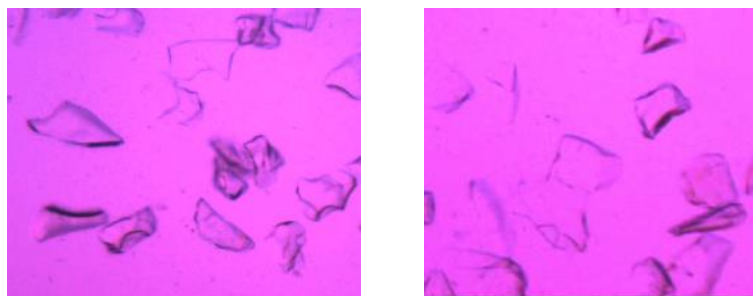


### 3.2 Grau de Vitrificação

Aliado a uma notável aparência vítrea das amostras (Figura 5), graus de vitrificação de até 100% foram determinados (Figura 6). Em geral, os graus de vitrificação da granulação a seco são comparáveis com a granulação com água.



**Figura 5** – Planta industrial da Paul Wurth



**Figura 6** – Análise de vitrificação, a nível microscópico, de amostras de escória granulada com água (à esq.) e a seco (à dir.)

### 3.3 Resistência de compressão

A resistência à compressão é o parâmetro mais importante para medir a qualidade da escória granulada introduzida no cimento. Diversos testes foram realizados para comprovar a correspondência entre granulação a seco e granulação com água. A tabela 1 indica os resultados entre duas amostras de composição química semelhante, medidas depois de 2, 8, 28 e 91 dias. Dentre as conclusões resultantes, destaca-se resistência à compressão comparável entre os dois processos.

**Tabela 1** – Resistência à compressão entre granulação a seco e com água, para duas amostras em duas condições

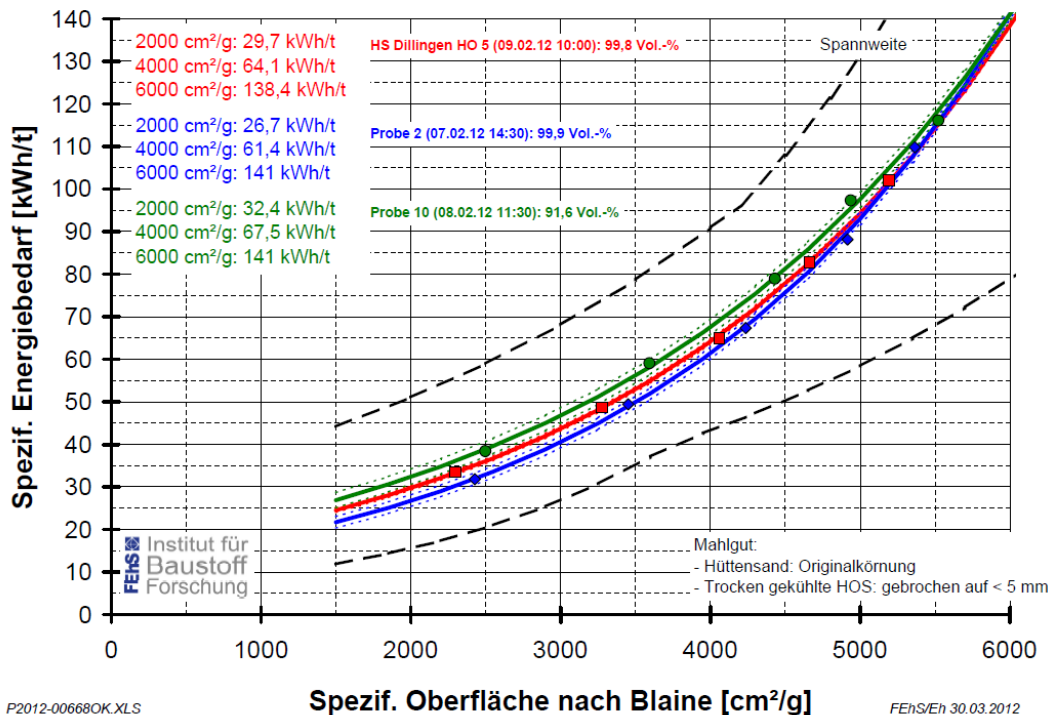
Dias	<i>Escória AF:CEM I = 50:50</i> <i>Resistência à compressão</i> <i>MPa</i>			<i>Escória AF:clínquer = 75:25</i> <i>Resistência à compressão MPa</i>		
	2d	7d	28d	2d	7d	28d
Granulação com água	14.6	35.2	58.8	12.8	28.2	37.7
Granulação a seco	14.3	33.8	57.0	10.4	27.0	38.6

\* *Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*



### 3.4 Moabilidade

O teste executado foi o de moabilidade Zeisel, um teste padronizado que determina a energia necessária para moer um material de granulometria específica. Os resultados indicam energia específica de moagem para as amostras de granulação a seco como sendo comparáveis às da granulação convencional a água.



## 4 CONCLUSÃO

Até o presente momento, não foram identificadas desvantagens técnicas em relação ao uso do sistema de granulação a seco da Paul Wurth. Além da exata semelhança ou, em alguns casos, superioridade de características em relação à granulação com água, destaca-se, ainda, uma série de outras vantagens inerentes a este processo. São elas: redução nos custos de manuseio e transporte da escória granulada devido à ausência de umidade residual; espaço reduzido de armazenamento devido à maior densidade aparente; possibilidade de recuperação da energia latente contida na escória, dentre outras.

Concluída a primeira fase e o comissionamento da planta piloto, será dado início a segunda fase que inclui a implementação do sistema de recuperação de energia, incluindo o trocador de calor.

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.