

## Nota Técnica

# REUSO DO PÓ DE SILÍCIO ORIUNDO DA PRODUÇÃO DE SEMICONDUTORES NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL REUSE OF SILICON POWDER ARISING OUT OF PRODUCTION OF SEMICONDUCTORS IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Antonio S. BREJÃO<sup>1\*</sup>

Marcos de O. MORAIS

Oduvaldo VENDRAMETTO

## RESUMO

Para a indústria de semicondutores, o resíduo de pó de silício é um problema na esfera da ecologia industrial. A proposta deste trabalho é analisar as características deste resíduo, objetivando o fechamento do ciclo de produção. O pó de silício obtido através do processo do corte das lâminas de silício foi caracterizado por ensaios físicos e por microscopia ótica. Após a separação, o resíduo foi adicionado ao cimento comum formando corpos de prova e com isso, avaliou-se o possível ganho na resistência à compressão comparada ao cimento comum, comprovando a viabilidade técnica da utilização deste tipo de resíduo na fabricação de produtos de cimento.

**Palavras-chave:** ecologia industrial, semicondutores, reuso, resíduo, pó de silício.

## ABSTRACT

For the semiconductor industry, the residue of silicon powder is a problem in the field of industrial ecology. The purpose of this paper is to analyze the characteristics of this waste, aiming to close the production cycle. Silicon powder obtained through the cutting process of the silicon wafers was characterized by physical tests and optical microscopy. After separation, the residue was added to the cement forming joint specimens and therefore, we assessed the possible gain in compressive strength compared to ordinary cement, proving the technical feasibility of using this type of waste in the manufacture of cement products.

**Keywords:** industrial ecology, semiconductors, reuse, silicon powder.

---

<sup>1</sup> Universidade Paulista – UNIP - Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Rua Dr. Bacelar 1212, São Paulo, Brasil - e-mail: [prof.sergiobrejao@uol.com.br](mailto:prof.sergiobrejao@uol.com.br)

## INTRODUÇÃO

A gestão dos resíduos industriais está inserida na ecologia industrial, pois a partir dos fluxos de materiais o reaproveitamento de resíduos pode ser avaliado com os outros sistemas na empresa.

Nesta lógica, e no fluxo dos resíduos pretende-se chegar a um ciclo fechado, pois se tem a preocupação com o fechamento do ciclo de produção, que pode ser obtido pela formação de um ecossistema industrial, onde o consumo de energia e materiais é otimizado e os efluentes e resíduos de um processo servem como matéria-prima para outros processos (Costa et al., 2012).

Essa é uma característica que faz parte da indústria do setor eletroeletrônico; além disso, este setor favorece a formação de ecossistemas industriais externos e internos. Para a formação de um ecossistema industrial é preciso transpor quatro barreiras, sendo os aspectos técnicos, econômicos, organizacionais e legais (Queiroz, 2006); (Arbucias, 2008); (Ayres et al., 1996).

Para a indústria de semicondutores, a utilização do conceito de ecologia industrial foi facilitado pelas características do setor. Esse setor, nas últimas três décadas do século vinte teve como característica a minimização das emissões de resíduos durante o processo de produção, mesmo com o

aumento expressivo do consumo de equipamentos eletroeletrônicos. (Toporcov, 2009); (Borchardt et al., 2007); (Gameiro, 2002); (Queiroz, 2006).

Para (Fonseca, 2010), a sílica é uma das adições minerais de maior reatividade, e em função do tamanho extremamente pequeno de suas partículas e a sua natureza sem uma forma determinada. Suas partículas são esféricas, de diâmetro cem vezes menor que o do cimento. Por ser mais fina que as do cimento, as partículas da sílica gera uma estrutura com homogeneidade reduzindo os vazios da estrutura.

Para reforçar o estudo, (Lee & Liu, 2009) fizeram um experimento com o lodo seco e pulverizado proveniente do tratamento de água de uma indústria de semicondutores para substituir de 5 a 20% em peso do cimento portland em argamassa de cimento e constataram que a resistência à compressão foi maior que a do cimento comum após três dias de cura. No caso da substituição de 10% em peso, a resistência à compressão aumentou de 25 a 35% após cura de 7 a 90 dias.

Neste sentido, o fechamento de ciclo na indústria de semicondutores apresenta uma importante oportunidade de negócios e o uso do pó de silício.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Pesquisa exploratória com descrição direta do caso em uma indústria de semicondutores. A empresa realiza o processo de encapsulamento e teste de circuitos integrados a partir de lâminas de silício.

Após a análise inicial do sistema de produção, foi retirado o pó de silício através da dispersão aquosa do silício produzido bem como do lodo obtido por precipitação desse silício. O

objetivo foi determinar características do material e compará-las com produtos existentes no mercado, visando uma possível substituição.

O tamanho de partícula foi analisado por microscopia óptica (microscópio digital com 400X de ampliação máxima). Foi verificada a possível melhoria da resistência estrutural de argamassa pelo uso da dispersão. A sílica dividida possui o nome comercial de microsílca e é

utilizada na construção civil para a produção de cimento mais resistente.

Testes distintos foram efetuados sendo que o primeiro correspondeu com a fabricação de corpos de prova utilizando mistura de dispersão/cimento e obtenção de imagens por microscopia óptica. Os corpos de prova são cilíndricos e têm dimensão de 100 mm de comprimento e 25 mm de diâmetro. Para comparação, corpos de prova com água de consumo humano foram também fabricados. Neste caso, tentou-se verificar a fabricação de

argamassa, para utilização como agente estrutural, ou seja, avaliar existência de vazios no material que formam os blocos.

Foram produzidos oito corpos de prova distintos, quatro com água residuária e quatro com água para consumo humano. O segundo experimento foi executado de acordo com as normas para testes de resistência à compressão de cimento (NBR's 5733 e 7215), com análise ocorrendo após 28 dias da produção dos corpos de prova.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados conforme a metodologia e avaliaram-se possíveis utilizações do coproduto. Na Figura 1, é apresentado um

fluxograma da produção e uso de água do setor de corte das lâminas de silício onde ocorre a dispersão de pó de silício.

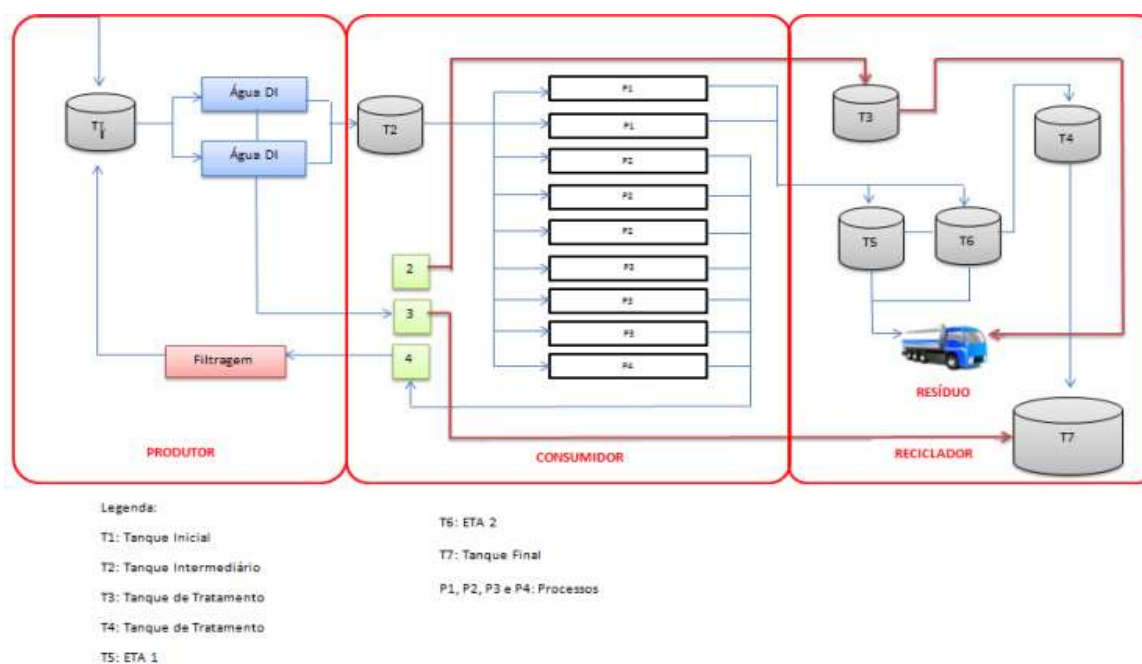


Figura 1: Fluxograma simplificado dos processos úmidos da empresa em estudo.

Imagens do material obtido nesta secagem podem ser vistas na Figura 2. As partes claras da figura são devidas ao material utilizado para a coalescência, o que foi comprovado pela facilidade de dissolução do material seco. Assim, as pequenas partículas pretas e com aparência

retangular da figura correspondem às partículas de silício, e a microscopia óptica indica dimensões da ordem de 1 a 3 micras, o que é consistente com o obtido em estudo anterior que também ocorreu em uma indústria do setor de eletrônicos (Gameiro, 2002).



Figura 2: Fotos típicas do pó de silício presente na água residuária após a secagem.

A análise da agregação do pó de silício para reforço em cimento estrutural foi processada de acordo com as normas para teste de argamassa. Os testes de resistência à compressão de cimento indicaram uma melhora na resistência à compactação de aproximadamente 25% e na Figura 3 é reproduzida a planilha de teste obtida. Este resultado torna a água residuária útil na

fabricação de cimento estrutural. Observa-se que o material sólido é cerca de 1% em massa, valor bem abaixo dos normalmente utilizados para reforço de cimento, que é da ordem de 5% - o que pode gerar resistência de até 60 MPa - e utiliza material conhecido como microsílca, que é um subproduto das indústrias de silício metálico e ligas ferrosilício (Reis, 2001); (Brejão et al., 2013).

Planilha de resistência à compressão do cimento ensaiado - Pesquisa Paulo/Celso

Pesquisa Paulo - Cimento CP V - ARI com água potável  
Ruptura 28 dias - 24/05/12

CP Nº	DIÂM. (mm)	CARGA (kgf)	CARGA (N)	ÁREA S (mm <sup>2</sup> )	Fc <sub>j28</sub> (Mpa)
1	50,2	8890,00	86791,95	1979,23	43,9
2	50,2	7350,00	72081,43	1979,23	36,4
3	50,2	7000,00	68649,00	1979,23	34,7
4	50,0	7980,00	78259,86	1963,50	39,9
5	50,4	6140,00	60214,98	1995,04	30,2
6	50,2	6720,00	65903,04	1979,23	33,3
				f <sub>medio1</sub>	36,4
				f <sub>medio2</sub>	34,9
				f <sub>medio3</sub>	33,6
				f <sub>medio4</sub>	34,8

DRM1 = 20,5%  
DRM2 = 14,2%  
DRM3 = 10,3%  
DRM4 = 4,7% **OK** Portanto Fc<sub>j28</sub> = 34,8 Mpa

Pesquisa Celso - Cimento CP V - ARI com água com sílica  
Ruptura 28 dias - 01/06/12

CP Nº	DIÂM. (mm)	CARGA (kgf)	CARGA (N)	ÁREA S (mm <sup>2</sup> )	Fc <sub>j28</sub> (Mpa)
1	50,1	7750,00	76004,25	1971,36	38,6
2	50,2	8750,00	85811,25	1979,23	43,4
3	50,1	8690,00	84340,20	1971,36	42,8
4	50,1	7120,00	69825,84	1971,36	35,4
5	50,1	5080,00	49847,56	1971,36	25,3
6	50,2	8560,00	83947,92	1979,23	42,4
				f <sub>medio1</sub>	41,3
				f <sub>medio2</sub>	42,5
				f <sub>medio3</sub>	43,4

DRM1 = 14,2%  
DRM2 = 5,2%  
DRM3 = 4,0% **OK** Portanto Fc<sub>j28</sub> = 43,4 Mpa

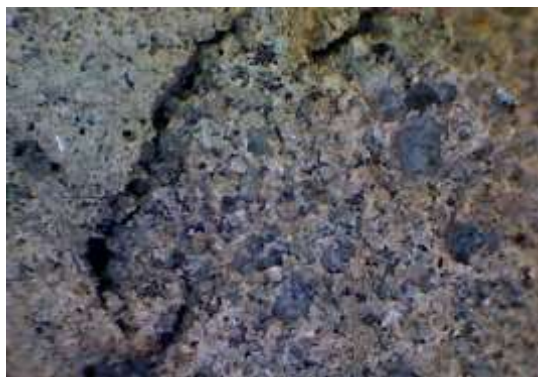
Conclusão: Diferença de 8,6 Mpa na média

Figura 3: reprodução da planilha de teste de resistência à compressão de cimento

A provável explicação para o comportamento obtido é a remoção de vazios na mistura da argamassa pela adição da água residuária com pó de

silício. As imagens dos corpos de provas, obtidas por microscopia óptica, são apresentadas na Figura 4, que de modo geral, a aparência é de um

material mais compacto, isto é, com



menor ocorrência de vazios.



Figura 4: Microscopia óptica de argamassa produzida com água residuária.

A análise indicou que o pó de silício corresponde em volume a, no máximo, 10% do material recolhido. Assim, o coproduto pó de silício pode ser útil como reforço estrutural, se

### CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi propor a transformação e o reaproveitamento do pó de silício disperso na água residuária, denominados neste trabalho como

### AGRADECIMENTOS

À empresa pelo material cedido, e aos seus colaboradores por contribuir com a pesquisa bem como

### REFERÊNCIAS

ARBUCIAS, J. G. Melhoria da Sustentabilidade pela Aplicação do Conceito de Ecologia Industrial: Estudo de Caso no Setor Eletroeletrônico, Tese, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008. 162 p.  
 AYRES, R.U; AYRES, L.; FRANKL, P. Industrial ecology: towards closing the materials cycle. Cheltenham, UK E. Elgar Brookfield, Vt., US 1996, 379 p.  
 BORCHARDT, M.; SELLITTO, M. A.; PEREIRA, G. M.; POLTOSI, L. A. C., Implementação do *ecodesign*: um estudo de caso na indústria eletrônica. ENEGEP 2007, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 09 a 11/10/2007. Disponível em:

usado na dispersão. A vantagem da dispersão é que esse pó apresenta alta pureza, é inerte e corresponde a um grande volume.

coprodutos da indústria de semicondutores, os quais podem ser reaproveitados na indústria da construção civil, tendo-se assim um ciclo de produção mais fechado.

aos pesquisadores do laboratório da FATEC-SP, pela contribuição e cooperação técnica.

[http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2007\\_TR670485\\_9203.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2007_TR670485_9203.pdf).  
 BREJÃO, A. S.; SHIKI, M. P.; CALDANA, A. E.; SILVA, M. L. P. Coprocessamento de pó de silício para simbiose industrial: Um estudo de caso em uma empresa de semicondutores. International Workshop Advances In Cleaner Production - Integrating Cleaner Production Into Sustainability Strategies – São Paulo – Brasil: 2013.  
 COSTA, M. I. L.; SILVA, E. R; MATTOS, U. A. O., 20 anos de Eco-eficiência no Brasil: de estratégia de negócios a princípio de Política Pública, Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, 8(1) (2012) 3-28.

- FONSECA, G. C., Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica, Tese, Universidade Federal de Minas Gerais - programa de pós-graduação em construção civil, Belo Horizonte, 2010.
- GAMEIRO, J., Desenvolvimento de Tecnologias Mais Limpas Aplicadas à Microeletrônica, Dissertação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002, 102 p.
- QUEIROZ, E. F., Melhoria de Processos pelo Levantamento de Indicadores Ambientais via *Software*, Dissertação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006, 171p.
- LEE, Tzen-Chin & LIU, Feng Jiin, Recovery of hazardous semiconductor-industry sludge as a useful resource., *Journal of Hazardous Materials* 165 (2009) 359–365
- REIS, L. S. N., Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado, Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, 2001, 114p.
- TOPORCOV, V. P. Eco-Eficiência e Eco-Efetividade como Direcionadores de Geração de Valor em Projetos. Uma aplicação em uma empresa no Brasil, Dissertação, Escola de Administração de Empresas da Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2009, 88 p. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10438/5807>.