

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.

Proposta para reuso de água e lodo com partículas de Silício da produção de semicondutores como co-produto para produção de artefatos para a indústria da Construção Civil

Antonio Sérgio Brejão¹, Oduvaldo Vendrametto²; Marcos de Oliveira Morais³;
Celso Affonso Couto⁴; Leandro Forne Brejão⁵

Resumo - Este estudo destaca a geração dos resíduos água e lodo com partículas de silício originário do processo de corte de *wafers* de silício da indústria de semicondutores com a proposta de sua reutilização na indústria da construção civil como material agregado nos processos de fabricação de artefatos de concreto. Testes de resistência preliminares em laboratório indicaram possibilidades de aplicação como co-produto devido a resistência à compressão das amostras. Este estudo evidencia a aplicabilidade da adição da água e do lodo residuário com silício na mistura da argamassa para a produção de corpos-de-prova para simular a possibilidade de reutilização destes resíduos/co-produtos como aditivos à massa de concreto que serão demonstrados nos resultados.

Palavras-chave: Silício, Água e Lodo residuário, Co-produto, Construção Civil.

Abstract - This study highlights the generation of waste water and sludge with particles of silicon originating in the process of cutting wafers of silicon in the semiconductor industry with the proposed reuse in the construction industry as aggregate material in the manufacturing of concrete artifacts processes. Preliminary endurance tests in the laboratory indicate application possibilities as a co-product due to the compressive strength of the samples. This study demonstrates the applicability of the addition of water and the residuary sludge silicon in the mixture of mortar for the production of specimens to simulate the possibility of reusing such waste / by-products in mass additives which will be demonstrated in results.

Keywords: Silicon, Water and Sludge residuary, Co-product, Construction

1. Introdução

¹ Universidade Paulista – UNIP e-mail: prof.sergiobrejao@uol.com.br

² Universidade Paulista – UNIP e-mail: oduvaldov@uol.com.br

³ Universidade Paulista – UNIP e-mail: marcostecnologia@ig.com.br

⁴ Universidade Paulista – UNIP e-mail: celsoacouto@hotmail.com

⁵ Universidade Federal do ABC - UFABC e-mail: leandro.f.b.eae@gmail.com

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.

Novos métodos de gestão ambiental direcionam para a destinação correta dos resíduos industriais e esta gestão passa a ter outras aplicabilidades dentro do contexto empresarial propondo às empresas uma postura para pesquisa, preservação ambiental e criação de novas fontes de insumos.

O silício (Si) é o elemento químico mais utilizado no processo de produção de semicondutores para a microeletrônica e, além disso, é componente básico em materiais cerâmicos como, por exemplo, o cimento. Na etapa de corte de *wafers* de silício gera-se um resíduo caracterizado por partículas extremamente finas dispersas em água, o que compõem o lodo residuário conforme Figura 1.

Para efeito de pesquisas, os resíduos em questão serão denominados de co-produtos, o que indica que os referidos resíduos poderão ser aplicados como insumos para outros processos de produção.

Figura 1 - Produção do material residuário com (Si)



Fonte: Os autores

2. Referencial Teórico

O Silício (Si) é o segundo elemento do grupo 14 da tabela periódica e possui número atômico 14 e massa atômica de 28,085 ua (unidades atômicas de massa). Sua valência em meio aquoso é 4. A abundância média do (Si) na crosta da Terra é de 28% sendo portanto o segundo elemento mais abundante depois do oxigênio; em córregos é de 5 ppm e na água do mar é de 1 ppm. Silício não ocorre livre na natureza, mas sim como sílica livre (SiO_2), na forma cristalina (quartzo, cristal de rocha, ametista, etc), microcristalina (sílex, jaspe, etc) e variedades de quartzo, como principal componente da areia e arenito. O silício é encontrado em combinação com outros elementos em silicatos, representada por feldspato, hornblenda, mica, amianto e outros minerais de argila (ALVES, 2011).

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.

O silício também pode ser preparado reagindo-se SiO_2 (dióxido de silício - areia) com magnésio metálico ou com carvão. Em escala industrial, é preparado pela reação do óxido com coque. No entanto, quando é requerido um silício ultrapuro, para a fabricação de semicondutores para a microeletrônica, a preparação é feita pela decomposição de silano (SiH_4) ou de tetrahaletos de silício a altas temperaturas (PEIXOTO, 2001).

Este elemento é utilizado para a produção de ligas metálicas, na preparação de silicones, na indústria cerâmica e, por ser um material semicondutor muito abundante, tem um interesse muito especial na indústria eletrônica e microeletrônica, como material básico para a produção de transistores para *chips*, células solares e em diversas variedades de circuitos eletrônicos. O dióxido de silício, areia e argila são importantes constituintes do concreto armado e azulejos (ladrilhos), sendo empregadas na produção do cimento portland (ALVES, 2015).

O cimento portland é a denominação convencional mundialmente para o material usualmente conhecido na construção civil como cimento. As características e propriedades desses concretos e argamassas dependem da qualidade e proporções dos materiais com que são compostos. Dentre eles, entretanto, o cimento é o mais ativo, do ponto de vista químico. Pode-se dizer que o cimento é o principal responsável pela transformação da mistura dos materiais componentes dos concretos e das argamassas no produto final desejado (ABCP, 2002).

De acordo com Portal do Concreto (2016), o cimento portland pozolânico é acrescido de argila de pozolana, um composto que possui sílica reativa e que em contato com a cal atua como ligante hidráulico, conferindo ao cimento uma maior impermeabilidade e maior durabilidade, principalmente em estruturas que entram em contato com sulfatos. Sua composição conforme a Norma NBR 5736 deve ser:

- Clínquer e gesso: 45 a 85%;
- Material pozolânico: 15 a 50%;
- Calcário: 0 a 5%.

A aplicabilidade do silício na construção civil, foi estudada por Lee e Liu (2009) que demonstraram a utilização do lodo seco 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. A resistência à compressão foi maior que a do cimento comum após três dias de cura. Quando houve a substituição de 10% em peso, a resistência à compressão aumentou de 25% a 35% após cura de 7 a 90 dias.

Segundo o Serviço Geológico Americano (*United States Geological Survey* - USGS), os agregados são os recursos minerais mais acessíveis à humanidade.

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.

São as matérias-primas mais importantes usadas na indústria da construção civil. O concreto, em média, contém 42% de brita, 40% de areia, 10% de cimento, 7% de água e 1% de aditivos químicos, por metro cúbico. O concreto, em volume, é o segundo material mais consumido pela humanidade, sendo somente superado pela água (MME, 2009).

Estudos realizados por Brejão (2012), na análise da agregação do material residuário (água com partículas de silício) para aplicação como reforço estrutural – que foi processado conforme norma para teste em corpos-de-prova de concreto – indicaram ganho de resistência à compressão do material de aproximadamente 25%.

3. Método

Para se avaliar a possibilidade de reuso dos resíduos (água e lodo com partículas de silício), foram produzidos quatro lotes de corpos-de-prova com cinco amostras cada conforme Figura 2 e os testes de compressão foram realizados de acordo com a Norma ABNT NBR 5738/03.

Figura 2 - Lotes dos Corpos-de-Prova de concreto

Fonte: Os autores

As letras A, B, C e D nas respectivas amostras indicam os lotes com traços específicos. As Tabelas 1, 2, 3 e 4, indicam as proporções em massa de cada lote. Os corpos-de-prova foram produzidos em fevereiro de 2016 sendo o F_{cj} (resistência à compressão após sete dias de cura) para todos os lotes.

Tabela 1 - Corpos-de-Prova Lote (A)		Tabela 3 - Corpos-de-Prova Lote (C)	
Materiais/traços	Quantidade	Materiais/traços	Quantidade

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.

Areia	1,371 kg	Areia	0,685 kg
Cimento	0,392 kg	Cimento	0,392 kg
Água potável	0,117 kg	Lodo Residuário (Si)	0,685 kg

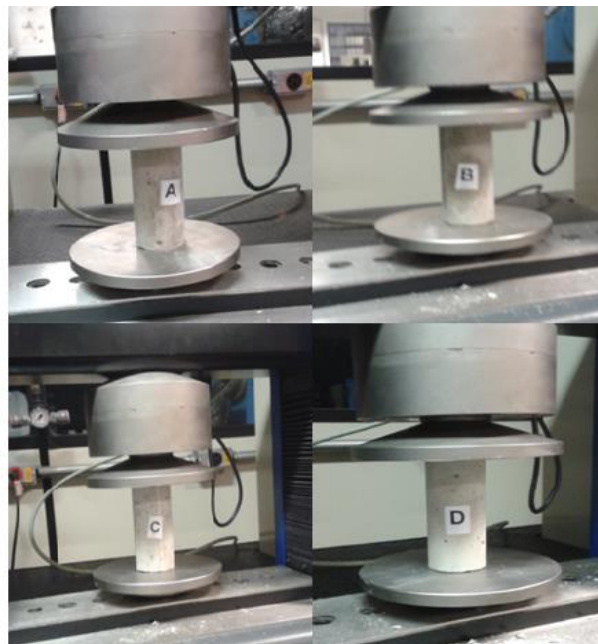
Tabela 2 - Corpos-de-Prova Lote (B)		Tabela 4 - Corpos-de-Prova Lote (D)	
Materiais/traços	Quantidade	Materiais/traços	Quantidade
Areia	1,371 kg	Areia	1,097 kg
Cimento	0,392 kg	Cimento	0,392 kg
Água Residuária (Si)	0,117 kg	Lodo Residuário (Si)	0,274 kg
		Água potável	0,117 kg

Fonte: Os autores

Os testes foram executados em março de 2016 no Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC). Equipamento utilizado para os testes Figura 3:

- Máquina universal para ensaios mecânicos de tração, compressão e flexão, modelo EMIC DL-10000, capacidade máxima de 100 KN.

Figura 3 - Teste de compressão dos Corpos-de-Prova de concreto



Fonte: Os autores

4. Resultados e Discussão

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.

Nas Tabelas 5, 6, 7 e 8 são apresentados os resultados de resistência à compressão de cada corpo-de-prova. Os valores de cargas apresentados nas tabelas referem-se às cargas de fratura da amostra, isto é, aquelas, a partir das quais, para cada corpo-de-prova, observou-se o surgimento e a propagação de trincas ao longo de seu tronco. Na Figura 4 é apresentada a variação média do valor de tensão máxima suportada (em MPa) em função do lote de corpos-de-prova.

Segundo o Portal do Concreto (2016), o cálculo de uma estrutura de concreto é feito com base no projeto arquitetônico da obra e no valor de algumas variáveis, como por exemplo, a resistência do concreto que será utilizado na estrutura. Portanto, a Resistência Característica do Concreto à Compressão (f_{ck}) é um dos dados utilizados no cálculo estrutural. Sua unidade de medida é o MPa (Mega Pascal), sendo:

- 1 Pascal: unidade de pressão exercida por uma força de 1 Newton, uniformemente distribuída sobre uma superfície plana de 1 metro quadrado de área, perpendicular à direção da força.
- Mega Pascal (MPa) = 10^6 Pascal = 10,1972 Kgf/cm².

Tabela 5 - Resultado do teste de compressão do lote (A)

C.P. (A)	Carga Aplicada (N)	F _{cj}	MPa
1	22743,97	7 dias	11,40
2	19063,58	7 dias	9,56
3	23084,33	7 dias	11,57
4	23577,38	7 dias	11,82
5	21630,63	7 dias	10,84
Média	22019,98		11,04

Fonte: Os autores

Tabela 6 - Resultado do teste de compressão do lote (B)

C.P. (B)	Carga Aplicada (N)	F _{cj}	MPa
1	18510,09	7 dias	9,28
2	23036,62	7 dias	11,55
3	12816,15	7 dias	6,42
4	15011,02	7 dias	7,52
5	14654,75	7 dias	7,35
Média	16805,73		8,424

Fonte: Os autores

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.

Tabela 7 - Resultado do teste de compressão do lote (C)

C.P. (C)	Carga Aplicada (N)	Fcj	MPa
1	6457,38	7 dias	3,24
2	4507,44	7 dias	2,26
3	5818,00	7 dias	2,92
4	8413,68	7 dias	4,22
5	8525,01	7 dias	4,27
Média	6744,302		3,382

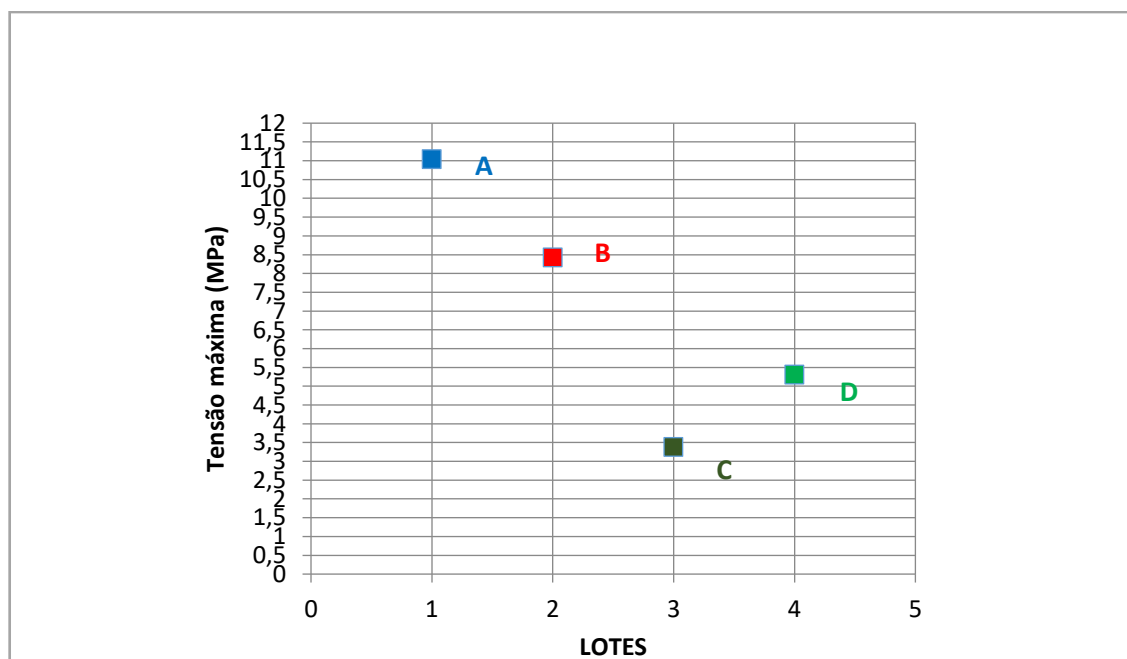
Fonte: Os autores

Tabela 8 - Resultado do teste de compressão do lote (D)

C.P. (D)	Carga Aplicada (N)	Fcj	MPa
1	9189,83	7 dias	4,61
2	10166,39	7 dias	5,10
3	12319,91	7 dias	6,18
4	9698,79	7 dias	4,86
5	11540,58	7 dias	5,78
Média	10583,1		5,306

Fonte: Os autores

Figura 4 - Médias de resistência à compressão dos corpos-de-prova em MPa.



Fonte: Os autores

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.

Seja a tensão de compressão crítica média para cada grupo de amostras em Kgf/cm^2 τ^* pode ser obtida pela relação conforme Eq. (1).

Em que τ é a tensão crítica média de cada grupo de amostras, em MPa e f é o fator de conversão entre escalas: $1\text{MPa} = 10,1972 \text{Kgf/cm}^2$ conforme Tabela 9.

$$\tau^* = f\tau \quad \text{Eq. (1)}$$

Tabela 9 - valores de tensão de compressão crítica média das amostras.

Amostras	τ (MPa)	τ^* (Kgf/cm²)
A	11,04	112,577
B	8,424	85,901
C	3,382	34,487
D	5,306	54,106

5. Considerações finais

Os testes indicaram que os resíduos (água e lodo residuário com silício) originários do processo de produção e operação de corte de *wafers* de silício pode ser útil como reforço estrutural em argamassa para artefatos de concreto.

A aplicação dos referidos resíduos, especificamente para o setor da construção civil, dependem de maiores estudos e pesquisas. Os testes em laboratório indicaram que quanto maior for a proporção do co-produto na constituição da mistura para uso em construção civil, maiores são os ganhos em resistência à compressão do material.

6. Agradecimentos

A Universidade Paulista – UNIP (PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO)

Ao PROSUP: Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições de Ensino Particulares - CAPES/PROSUP pelo apoio.

Tendências, Expectativas e Possibilidades no Cenário Contemporâneo em Educação Profissional e Sistemas Produtivos.

Ao Laboratório de Processamento e Caracterização de Materiais da Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC)

Referências

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - *Guia básico de utilização do cimento portland*. 7ed. São Paulo, 2002. 28p. (BT-106) ISBN 85-87024-23-X – Disponível em: http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106_2003.pdf Acesso em 16 jul. 2016.

ALVES, Nilton P. *Silício* – Disponível em: <http://www.quimlab.com.br/guiados elementos/silicio.htm> Acesso em 16 jul. 2016.

ALVES, Nilton P. *Guia de Variáveis de Água e Informações Analíticas*. Quimlab, São Paulo, 2011 – Disponível em: http://www.quimlab.com.br/arquivos/catalogo_variaveis_agua.pdf Acesso em 16 jul. 2016.

BREJÃO, A. Sérgio. *Possível Impacto da Logística Reversa na Melhoria da Sustentabilidade: Um Estudo de Caso do Setor Eletroeletrônico*. 148 f. - Dissertação de Mestrado - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza – (CEETEPS) – São Paulo, 2012.

LEE, Tzen Chin; LIU, Feng Jiin. *Recovery of hazardous semiconductor-industry sludge as a useful resource*. Journal of Hazardous Materials - Volume 165, Issues 1–3 (2009), Páginas 359–365 – Elsevier – Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389408014817>

MME – Ministério de Minas e Energia – *Agregados para Construção Civil*. Secretaria de Geologia Mineração e Transformação Mineral - SGM – Banco Mundial – Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento – BIRD - Produto 22 - Relatório Técnico 31 - Perfil de areia para construção civil – Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia. Agosto de 2009. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P22_RT31_Perfil_de_areia_para_construcao_civil.pdf/9745127c-6fdc-4b9f-9eda-13fa0146d27d Acesso em 16 jul. 2016.

PEIXOTO, Eduardo Motta Alves. *Química Nova na Escola – Elemento Químico: Silício N° 14*, Nov. 2001. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc14/v14a12.pdf> Acesso em 16 jul. 2016.

PORTAL DO CONCRETO - *Cimento Portland Pozolânico* - Disponível em: <http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/cp4.html> Acesso em 16 jul. 2016.

PORTAL DO CONCRETO - *Resistência Característica do Concreto à Compressão*. Disponível em: <http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/fck.html> Acesso em 16 jul. 2016