Co-Processamento de Pó de Silício para Simbiose Industrial: Um Estudo de Caso em uma Empresa de Semicondutores

BREJÃO, A. S.[a*], SHIKI, M. P.[b], CALDANA, A. E.[b], SILVA, M. L. P.[c, d]

a. Faculdade Paulista de Pesquisa e Ensino Superior – FAPPES

b. Smart Modular Technologies

c. Faculty of Technology of São Paulo

d. Polytechnic School, University of São Paulo

**Corresponding author, prof.sergiobrejao@uol.com.br*

Resumo

Para a área de eletroeletrônicos, o resíduo de pó de silício, na forma de dispersão aquosa, é um problema ambiental e econômico. Portanto, o objetivo desse trabalho foi analisar as características de tal material, através de um estudo de caso em uma empresa de semicondutores, objetivando o fechamento do ciclo de produção. As amostras de silício provenientes de processos de desbaste e corte de lâminas de silício foram caracterizadas por ensaios físicos e por microscopia ótica. Esse co-produto foi utilizado em corpos de prova de cimento e foram realizados ensaios para determinar possível melhora na resistência à compressão em função da adição da micro-sílica em comparação com o cimento comum. Os ensaios mostraram um aumento significativo na resistência à compressão comprovando a viabilidade técnica da utilização deste tipo de co-produto proveniente da indústria de semicondutores na fabricação de cimento. Apesar de o estudo mostrar evidências sobre a viabilidade técnica do uso desse tipo de co-produto, para que haja uma simbiose industrial interessante para ambas as partes, os aspectos logísticos também vão ser determinantes para que haja um interesse mútuo de cooperação.

Palavras-chave: *simbiose industrial, setor eletroeletrônico, co-produto, silício*

Introdução

A Ecologia Industrial - (EI) insere a indústria na lógica ecológica na qual sua sustentabilidade será avaliada a partir da minimização de consumo de recursos naturais e energéticos. Ao inserir os sistemas industriais na biosfera, a (EI) passa a tratar do *design* dos produtos e dos processos industriais a partir dos fluxos de materiais e energéticos, do reuso e da reciclagem e avalia as relações existentes das indústrias com os outros sistemas na empresa, entre empresas e em espaços regionais e nacionais. Assim, inseridos nesta lógica baseada no fluxo de matéria e energia em um ciclo fechado, se desenvolvem outros conceitos e técnicas, dentre eles, o de metabolismo e simbiose industrial. Como consequência, tem-se a preocupação com o fechamento de ciclos de produção, que podem ser obtidos 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 p.3-28).

Para a formação de ecossistemas industriais é importante que o empreendimento/setor sob estudo apresente grande escala de produção – o que é denominado como produtor primário (AYRES, 1996) – e metabolismo/simbiose industrial intensa, com formação de produtos e co-produtos com bom valor agregado. Como enfatizado por (QUEIROZ, 2006), essa é uma característica intrínseca do setor eletroeletrônico; além disso, como comprovado por (ARBUCIAS, 2008), o setor favorece a formação de ecossistemas industriais externos e internos. Além disso, como proposto por (AYRES, 1996) e citado por (FRAGOMENI, 2005), faz-se necessário avaliar o conjunto produtor primário/ consumidor/reciclador, pois "baseando-se no paralelo apresentado entre os sistemas biológicos e industriais, a Ecologia Industrial visa investigar, através da análise dos balanços dos fluxos de materiais, como os ecossistemas industriais podem "se fechar", analogamente ao modelo do produtor-consumidor-decompositor dos sistemas naturais". Assim, como resumido por (COSTA, 2002), "o modelo do produtor-consumidor-decompositor é adequado para investigar como os ecossistemas industriais podem "se fechar". Como os antropossistemas não apresentam ainda decompositores ou recicladores capazes de promover o fechamento, a busca se concentra em superar tal fragilidade". Para a aplicação do modelo produtor-consumidor-decompositor é importante, igualmente, considerar a Simbiose Industrial, "que aborda predominantemente as atividades industriais e comerciais que incluem o intercâmbio de matéria como sua principal característica" (TANIMOTO, 2004). Por fim, deve-se considerar, como discutido por (AYRES, 1996), que a formação de um ecossistema industrial precisa transpor 4 barreiras, nessa ordem: aspectos técnicos, econômicos, organizacionais e legais.

Para o setor eletroeletrônico, seu uso do conceito de (EI), tanto em grandes empresas quanto nas pequenas e médias (TOPORCOV, 2009) e (BORCHARDT ET AL., 2007), foi facilitado pelas características do setor. Esse setor, nas últimas três décadas do século vinte (GAMEIRO, 2002) e (QUEIROZ, 2006), teve como característica marcante a diminuição das emissões de resíduos durante o ciclo de produção, mesmo com o aumento expressivo do consumo de bens de alto valor agregado. Para o setor também é expressivo o consumo de silício e água no início da cadeia de produção. Para (GAMEIRO, 2002) a água é um dos insumos de maior custo e com maior potencial para uso em simbiose industrial; na indústria de semicondutores grande parte do consumo de água ultrapura (Resistividade>18Mohms) é utilizada na refrigeração de processos de desbaste e corte de lâminas de silício gerando uma saída de processo composta de água com uma quantidade de silício de alta pureza em suspensão.

Para Fonseca (2010), a sílica ativa é umas das adições minerais de maior reatividade, graças ao tamanho extremamente pequeno de suas partículas e à sua natureza amorfa. Suas partículas são esféricas, de diâmetro cem vezes menor que o do cimento. Por terem uma área específica elevada e granulometria mais fina que os cimentos, as partículas da sílica ativa densificam a zona de transição por ação física e química, gerando uma microestrutura mais densa e homogênea, com reduzido volume de vazios. Para o aproveitamento ideal deste material altamente pozolânico faz-se necessária a utilização de aditivos redutores de água, pois sua finíssima distribuição granulométrica tende a provocar um considerável consumo de água no concreto. Um estudo realizado por Tzen-Chin Lee; Feng-Jiin Liub: 2009, utilizou 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. A resistência à compressão foi maior que a do cimento comum após 3 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. Portanto, o fechamento de ciclo na área de eletroeletrônicos apresenta-se como uma oportunidade de negócios importante e o uso do pó de silício como co-produto uma chance de melhoria ambiental significativa. Assim, foi objetivo deste trabalho caracterizar tal resíduo e avaliar possíveis usos como co-produto.

2. Métodos

A metodologia utilizada foi o estudo de caso. A pesquisa, exploratória presume uma descrição direta do caso, que é tomado como unidade significativa do todo. Para tanto, três fases são cumpridas: 1 - Seleção e delimitação do caso; 2 - Trabalho de campo; 3 - Organização e redação do relatório. O estudo de caso pode incluir várias técnicas, tais como avaliação prévia do local sob estudo, que serão descritas no item resultados. Anteriormente, o estudo de caso mostrou-se promissor para avaliação do setor eletroeletrônico quanto a resíduos (QUEIROZ, 2006) e (ARBUCIAS, 2008). No presente caso,

uma equipe composta por membros da academia e do empreendimento foi formada, ou seja, a metodologia pôde dispor de visitas programadas e/ou entrevistas não estruturadas.

A empresa utilizada no estudo de caso é a maior fabricante de semicondutores no Brasil incluindo memórias DRAM e *Flash*. A empresa realiza o processo de encapsulamento e teste de circuitos integrados a partir de lâminas silício, processo conhecido na fabricação de *chip* como Processo *Back-End.*

Após a análise inicial do sistema de produção do empreendimento, testes foram efetuados com a dispersão aquosa de silício produzida e com lodo obtido por precipitação desse silício. O objetivo foi determinar características do material e compará-las com de produtos existentes no mercado, visando uma possível substituição. Para a dispersão determinou-se:

1) por observação direta, fatores qualitativos da água, tais como cor e a estabilidade da dispersão.

2) a massa de pó de silício presente, segundo norma de análise de água (NBR 10664/Abr 1989), o que requer evaporação em estufa. Foram processadas três amostras.

3) o tamanho de partícula por microscopia óptica (microscópio digital com 400X de ampliação máxima), tanto em dispersão quanto no pó recolhido por evaporação.

4) agregação do pó por aquecimento em mufla, na faixa de temperatura entre 300ºC a 1300ºC. Nessa faixa a maioria das cerâmicas é formada, sendo a sílica comumente usada nesta produção.

5) a possível melhoria da resistência estrutural de argamassa pelo uso da dispersão. A sílica finamente dividida e com o nome comercial de microsilica é utilizada na construção civil para a produção de cimento mais resistente; portanto, a dispersão foi testada para avaliar a capacidade do pó de silício em comportar-se como microsilica. Para tanto dois testes distintos foram efetuados. O primeiro correspondeu à fabricação de corpos de prova utilizando mistura de dispersão/cimento (Direcional Ltda) e obtenção de fotos por microscopia óptica. Os corpos de prova são cilíndricos e têm dimensão de 10 cm de comprimento e 25 mm de largura. 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 executados 8 corpos de prova distintos, 4 com água residuária e 4 com água para consumo humano. O segundo experimento foi executado de acordo com as normas para testes de Resistência à Compressão de Cimento (NBr 5733 e NBr 7215), com análise ocorrendo após 28 dias de fabricação do cimento. Neste caso o padrão é obtido pela fabricação de corpos de prova com água destilada e foram obtidos 6 corpos de prova de cada tipo.

Para o lodo, obtido por coagulação usando principalmente sais a base de alumínio, determinou-se:

1) semiquantitativamente, por microscopia óptica (microscópio digital com 400X de ampliação máxima), a porcentagem de silício presente no lodo.

2) agregação do pó por aquecimento em mufla, na faixa de temperatura entre 300ºC a 1300ºC, de modo similar ao testado com silício evaporado. Uma vez que sais de alumínio são usados na deposição de material particulado, a formação de cerâmica poderia ser privilegiada. De fato a Associação Brasileira de Cerâmica - ABCERAM cita três silicatos de alumínio naturais (Andalusita, Cianita, Silimanita) para fabricação de refratários aluminosos e também para a produção de alguns tipos de porcelana. A questão relevante é o comportamento térmico, que é fundamental na escolha de um dos três silicatos naturais e desconhecido no caso do lodo.

3. Resultados e discussão

Os resultados são apresentados na ordem mencionada na metodologia: análises do empreendimento, da dispersão e do lodo. Discutem-se, então, possíveis utilizações do co-produto.

A Fig. 1a apresenta fluxograma simplificado da produção e uso de água (no presente caso, pelas características do setor, deionizada ou (DI), onde a formação da dispersão de pó de silício ocorre). Para a empresa em questão, pelo fato de ser responsável pela produção de água deionizada (DI), uma vez que a alta pureza demanda a sua produção em loco, esta pode ser avaliada com a abordagem de produtor/consumidor/reciclador, ao menos no aspecto água (DI). Neste contexto toda a produção de água pode ser considerada como o produtor. Os equipamentos são aqui denominados os consumidores; neste caso, muito embora os processos sejam interligados, o consumo e descarte de cada equipamento pode ser considerado em separado. Por fim, o tratamento de efluentes corresponde ao reciclador. A análise do fluxograma inicial também indica que a água é reciclada internamente em vários ciclos, o que se compõem em um incipiente ecossistema interno. A água recebida pela empresa tem pureza próxima daquela usada normalmente para consumo humano e a descartada obedece à exigência de baixo conteúdo de metais pesados e orgânicos. A água descartada em etapas intermediárias da produção de água (DI) apresenta baixa quantidade de compostos iônicos, mas, sempre acima da etapa anterior em cerca de 50%. Isto significa que na última etapa de produção de água (DI), o produto descartado (água com alta quantidade de íons) pode apresentar um total de sólidos dissolvidos de até 300 ppm.

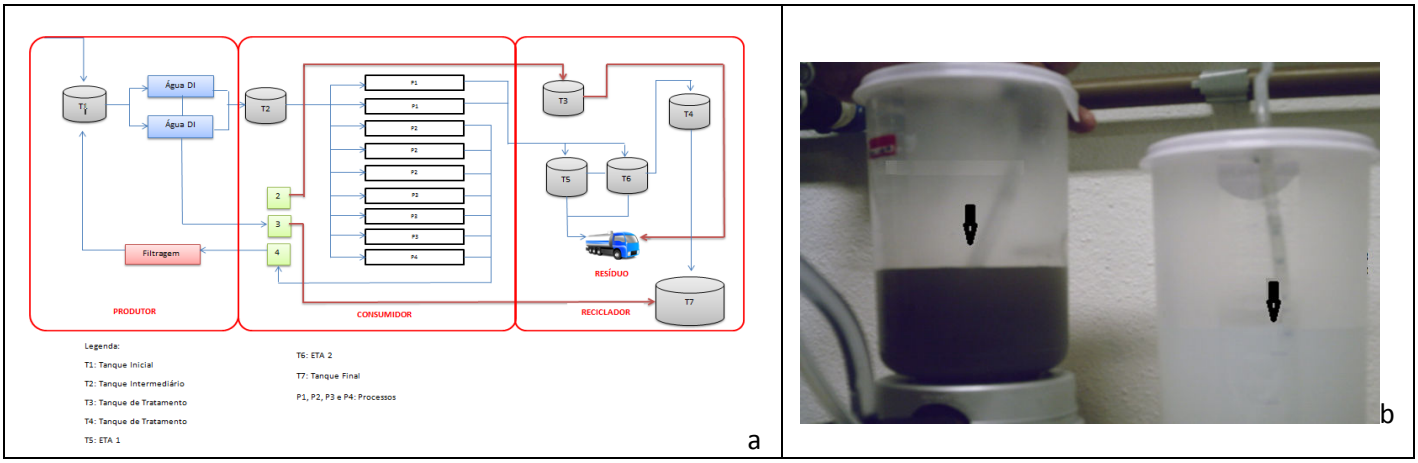

Fig. 1. (a) Fluxograma simplificado dos processos úmidos da Empresa em estudo; (b) imagem de recipientes com água residuária, ao fundo, e água deionizada, a frente. As flechas indicam nível de líquido.

A observação direta das amostras da dispersão apresenta coloração escura e homogeneidade (Fig. 1b), mantendo-se sem precipitação por no mínimo uma semana, ou seja, trata-se de uma dispersão de silício bastante estável. Esse comportamento é consistente com a avaliação por microscopia, que indicou que as partículas de silício têm dimensão da ordem de mícron, ou seja, são pequenas o suficiente para manter a dispersão por longo tempo (Santos, Prado e Vidal: 2004).

Água residuária

As amostras que sofreram secagem apresentaram uma composição em massa entre 0,08 a 0,1%, como apresentado na Tabela 1. Fotos típicas do material obtido nessa secagem podem ser vistas na Fig. 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 em ácido nítrico diluído. Assim, as pequenas partículas pretas e com aparência retangular (ângulos de 90º) 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 por (GAMEIRO, 2002), em estudo anterior; estudo este que também ocorreu em uma indústria do setor de eletroeletrônicos, mas responsável pela produção de diodos. Neste caso, a dispersão foi caracterizada como partículas de silício (determinado por espectroscopia Raman) dispersas em água e tamanho da ordem de 5 micras.

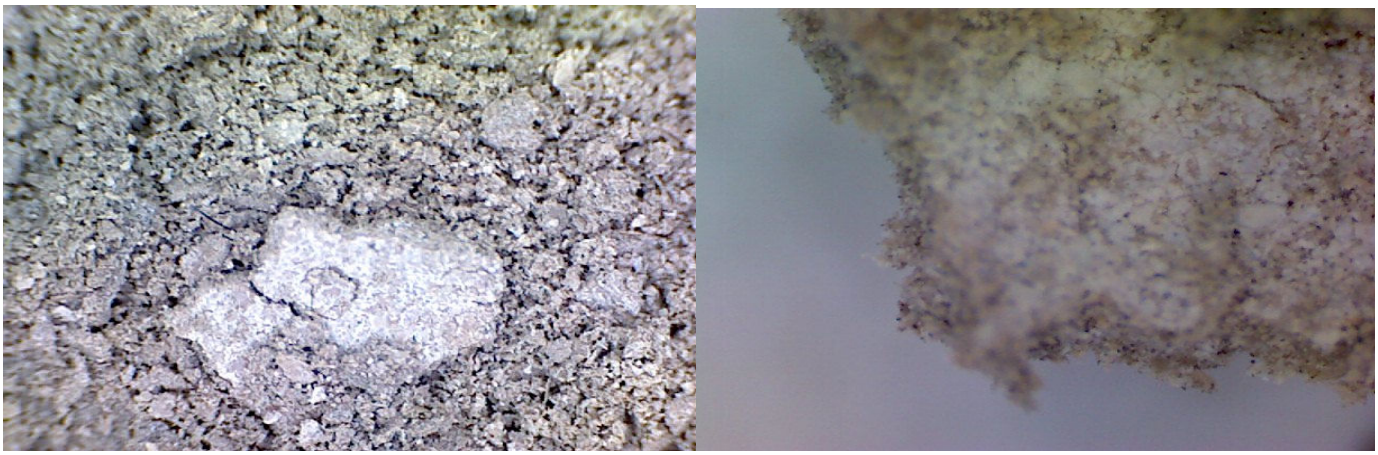

Fig. 2. Fotos típicas do pó de silício presente na água residuária após a secagem em estufa

Tabela 1: Composição em Massa das amostras de água residuária (dispersão de pó de silício em água)

Teste de Sólidos Totais a 80° C por 24 horas			
Nº da Amostra	Massa de Amostra (gramas)	Massa de Sólido (gramas)	% em Massa de Sólido
1	105,69	0,110	0,100
2	100,32	0,080	0,079
3	93,3	0,070	0,086

O aquecimento das partículas só possibilita a agregação a partir de temperaturas de 1300ºC, como pode ser observado nas fotos obtidas por microscopia e apresentadas na Fig. 3. O aumento da massa por aquecimento, Tabela 2, é indicativo de oxidação, provavelmente do pó de silício.

Tabela 2: Massa do pó presente na água residuária após aquecimento

Comportamento Térmico do Material Sólido			
Nº da amostra	Massa do Cadinho antes do aquecimento (gramas)	Massa do Cadinho após aquecimento (gramas)	Temperatura do Processo
1	23,0879	23,1794	700° C
2	24,9559	25,0343	500° C
3	24,9137	25,0056	300° C

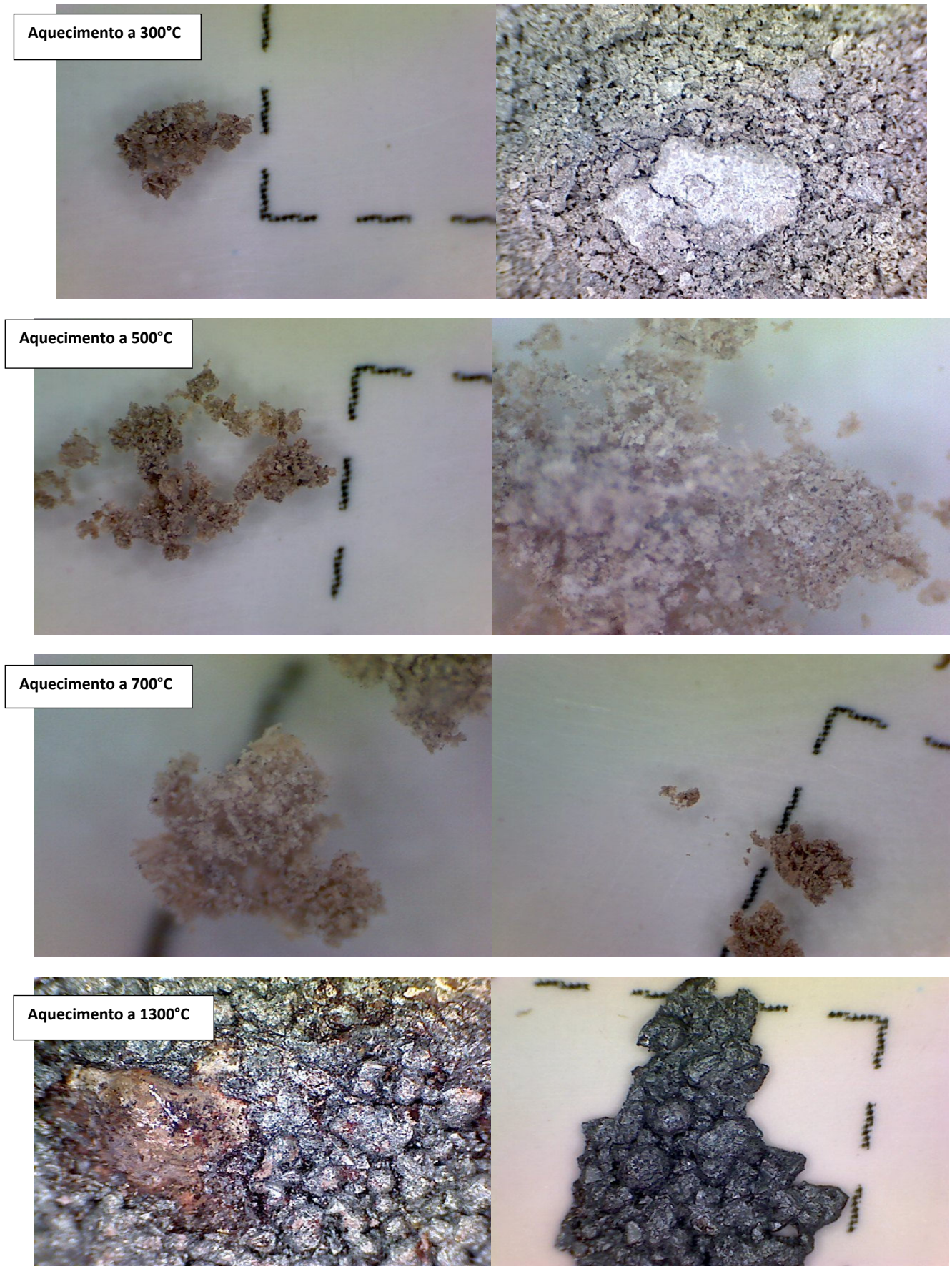

Fig. 3. Fotos obtidas por microscopia após aquecimento das partículas em temperaturas de 300ºC, 500ºC, 700ºC e 1300ºC. Os traços na escala correspondem a 1 mm.

A análise da agregação do pó para reforço estrutural foi processada de acordo com as normas para teste de argamassa. Os testes de Resistência à Compressão de Cimento indicaram que ocorre uma melhora na resistência à compactação de aproximadamente 25% e a Fig. 4 reproduz a planilha de teste obtida. Este resultado torna a água residuária útil na fabricação de cimento estrutural**.** Observe-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 microsílica, ou sílica ativa ou fumos de sílica, e que é um subproduto das indústrias de silício metálico e ligas ferro-silício (REIS, 2001). A provável explicação para o comportamento obtido é a remoção de vazios na mistura da argamassa pela adição do material. As fotos dos corpos de provas, obtidas por microscopia óptica, são apresentadas na Fig. 5. De modo geral, a aparência é de um material mais compacto, isto é, com menor ocorrência de vazios. Além disso, o fato do pó atuar como reforço estrutural indica que provavelmente sua superfície contém sílica, o que é consistente com a possibilidade da dispersão não decantar por cerca de uma semana.

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 (mm²)	Fcj28 (Mpa)
1	50,2	8850,00	86791,95	1979,23	43,9
2	50,2	7350,00	72081,45	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
				fcmédio1	36,4
				fcmédio2	34,9
				fcmédio3	33,6
				fcmédio4	34,8

DRM1 = 20,5%
DRM2= 14,2%
DRM3= 10,3%
DRM4= 4,7% OK Portanto Fcj28 = 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 (mm²)	Fcj28 (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	8600,00	84340,20	1971,36	42,8
4	50,1	7120,00	69825,84	1971,36	35,4
5	50,1	9080,00	89047,56	1971,36	45,2
6	50,2	8560,00	83947,92	1979,23	42,4
				fcmédio1	41,3
				fcmédio2	42,5
				fcmédio3	43,4

DRM1 = 14,2%
DRM2 = 9,2%
DRM3 = 4,0% OK Portanto Fcj28 = 43,4 Mpa

Conclusão: Diferença de 8,6 Mpa na média

Fig. 4. reprodução da planilha de teste de Resistência à Compressão de Cimento

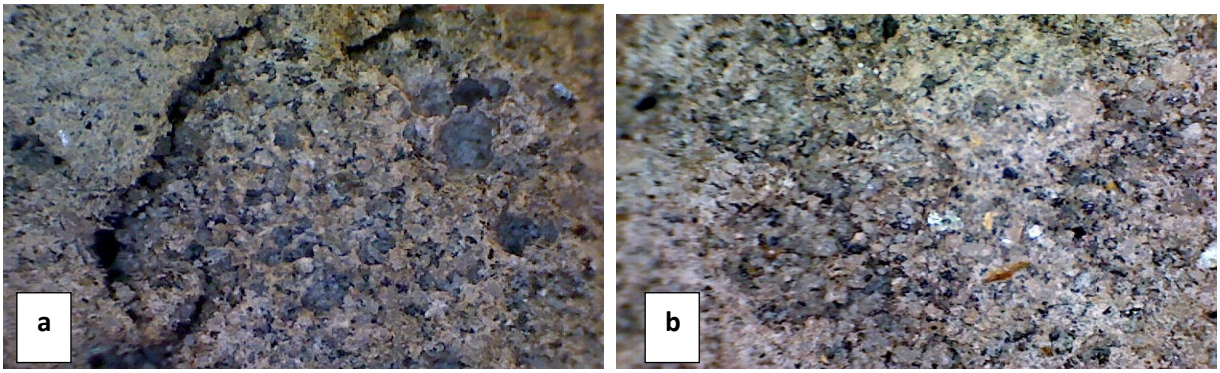

Fig. 5. Microscopia óptica de argamassa produzida com (a) água ou (b) água residuária.

A análise do lodo indicou que o pó de silício corresponde em volume a, no máximo, 10% do material recolhido. Assim, no processo atual de tratamento de água residuária, o material encontra-se muito disperso, o que dificulta sua obtenção para comercialização, sendo indicado o uso do lodo como produzido. O aquecimento também apresentou resultados semelhantes aos obtidos com a dispersão, ou seja, a agregação requer alta temperatura (~1300ºC).

Assim, o co-produto pó de silício pode ser útil, portanto, para dois usos distintos: produção de cerâmicos, se removido da água (na forma de lodo), ou reforço estrutural, se usado na dispersão. A vantagem da dispersão é que esse pó apresenta alta pureza, é inerte e corresponde a um grande volume. Portanto, um estudo logístico pode revelar quais as prováveis indústrias e qual a mínima distância em que há vantagens econômicas na formação de simbiose industrial, como segue:

- *Para água residuária:*

Após tratamento - pode ser utilizada em metalúrgicas desenvolvedoras de processos galvânicos e de cromação da região. Devido ao custo do transporte, contudo, os processos galvânicos devem estar próximos.

Sem tratamento - poderia desenvolver um piloto para utilizar a dispersão de silício no processo de produção de telhas, uma vez que seu processo de fabricação consome água em grande quantidade.

- *Para o Co-produto (silício removido da água residuária por decantação):*

Por aquecimento - poderia ser usado por indústrias produtoras de cerâmica.

Por secagem - poderia ser usado em blocos de concreto, telhas etc.

Como a logística é um fator extremamente relevante nas questões apresentadas acima, deve-se avaliar o que segue:

1. Na primeira hipótese, como os possíveis parceiros estão muito próximos ao parque industrial, não há a necessidade de se mensurar o custo logístico, pois o transporte do co-produto poderia ser efetuado através de tubulações.

2. Na segunda hipótese, há de se considerar o custo do transporte para entrega do co-produto para, assim, analisar sua viabilidade econômica.

Nesta situação, a proposta é comercializar o co-produto com empresas instaladas geograficamente na região, visando-se minimizar os custos logísticos com transporte. De acordo com BALLOU (2007, p.113), "o transporte representa o elemento mais importante do custo logístico na maior parte das empresas. O frete costuma absorver 2/3 do gasto logístico...".

Em uma pesquisa realizada nas proximidades da empresa objeto de estudo, verificou-se a possibilidade de negócios com o co-produto em empresas que utilizam processos galvânicos, produção de telhas e de blocos estruturais de cimento que estão instaladas próximo ao seu parque industrial minimizando assim os custos logísticos de transporte o que pode proporcionar à empresa uma maior competitividade e sustentabilidade.

4. Conclusões

Segundo Reis (2001) a sílica ativa tem uma grande lista de vantagens, aumenta a proteção à tração, à abrasão, à erosão, à corrosão, a ataques químicos, permite menor permeabilidade, porosidade e absorção além de maior aderência entre concreto novo e concreto velho. Contudo, a distribuição granulométrica das partículas é duas ordens de grandezas mais finas que o cimento Portland comum, dificultando o manuseio. Esse trabalho verificou que um resíduo comum ao setor eletroeletrônico apresenta propriedades similares às da sílica ativa. Apesar de preliminares, os resultados encontrados

permitem propor a formação de parceiros (simbiose industrial) e principalmente o uso da logística para destinação correta de tais insumos. Isso tem um impacto positivo na sustentabilidade que, em conjunto com outras providências, pode diminuir significativamente as emissões no setor eletroeletrônico.

Este estudo foi proveitoso ao propor a transformação e o reaproveitamento de resíduos denominados co-produtos do setor eletroeletrônico, os quais podem ser reaproveitados no próprio processo produtivo ou até comercializados, tendo-se assim um ciclo de produção mais fechado. Como o custo logístico em algumas situações é maior que o custo do produto, a adoção de novas estratégias de negócios poderão refletir nos resultados da empresa tornando-a mais sustentável e competitiva no mercado.

A logística pode ter um papel fundamental na avaliação dos custos totais e pode contribuir ou mesmo conciliar com o aumento de produtividade e com o desenvolvimento tecnológico, pois com recursos (insumos) finitos e com a velocidade de transformação dos recursos naturais, se faz necessário ter uma visão sistêmica dos processos e uma produtividade mais eficiente, bem como trazer soluções para gerenciar esta velocidade e a consequência ambiental gerada por tais processos, resolvendo-se, assim, a dicotomia "desenvolvimento versus sustentabilidade".

5. Referências

ARBUCIAS, Janaina Gameiro. 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.

Associação Brasileira de Cerâmica - ABCERAM cita três silicatos de alumínio naturais (Andalusita, Cianita, Silimanita) para fabricação de refratários aluminosos e também para a produção de alguns tipos de porcelana. Disponível em: http://www.abceram.org.br/site/?area=4&submenu=47.

AYRES, R.U, AYRES, L., FRANKL, P. Industrial ecology: towards closing the materials cycle. Cheltenham, UK E. Elgar Brookfield, Vt., US 1996, 379 p.

BALLOU, R. H. Logística empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física. Tradução: Hugo T. Y. Yoshizaki. São Paulo: Atlas, 2007.

BORCHARDT, M., SELLITTO, M. A., PEREIRA, G. M., POLTOSI, L. A. C., Implementação do *ecodesign*: um estudo de caso na indústria eletrônica. Miriam Borchardt, , ENEGEP 2007, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 09 a 11 de outubro de 2007. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2007_TR670485_9203.pdf.

COSTA, M. M., Princípios de ecologia industrial aplicados à sustentabilidade ambiental e aos sistemas de produção de aço, Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2002, 257 p. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/mmdacosta.pdf

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.

FRAGOMENI, A. L. M., Parques Industriais Ecológicos como Instrumento de Planejamento e Gestão Ambiental. Cooperativa Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2005, 110 p. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/alfragomeni.pdf

GAMEIRO, J., Desenvolvimento De Tecnologias Mais Limpas Aplicadas À Microeletrônica, Dissertação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002, 102 p.

SANTOS, H.R., PRADO, G.S., VIDAL, C.M.S., Applicability of particle size measurement techniques in water and wastewater treatment systems, Eng. Sanit. Ambient. 9 (4) (2004) 291–300.

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 dm Engenharia de Estruturas, 2001, 114p.

TANIMOTO, A. H., Proposta de simbiose industrial para minimizar os resíduos sólidos no Pólo Petroquímico de Camaçari. Dissertação, UFBA, Salvador - BA, 2004, 151 pag. Disponível: http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd48/disserta.pdf

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.

6. Agradecimentos

À indústria pelas amostras e aos seus funcionários pela atenção; ao laboratório de MCC/FATEC-SP, pela realização das medidas em argamassa segundo norma técnica.