
Produção de "Agregado Leve" à partir do Lodo do Esgoto*

PROF. DR. CARLOS DIAS BROSCHE
ENG. SILVIO BENEDICTO ALVARINHO
ENG. HIRAN RODRIGUES DE SOUZA

* Trabalho apresentado no 8.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Rio de Janeiro, Dezembro de 1975. (Pesquisa realizada através do Convênio SABESP/IPP)

I — INTRODUÇÃO

Por "agregado leve" — "light weight aggregates" — se entende um material cerâmico com propriedades especiais e adequadas à composição de um "concreto leve" para construção civil.

O "concreto leve" serve não só como elemento de embasamento (pisos) e divisório (paredes e painéis), mas também como elemento estrutural — concreto armado — mercê de suas propriedades mecânicas e físicas, que alcançam níveis característicos satisfatórios, semelhantes aos do concreto normal.

Nos E.U.A. o concreto leve está muito difundido, predominando este tipo de concreto na confecção dos blocos de concreto vazados para construção civil. Assim, por exemplo, o piso da grande ponte de S. Francisco sobre a baía de Oakland é construído em "concreto leve" decorrendo desse emprego em substituição ao piso de concreto comum, uma economia de mais de 3 milhões de dólares em aço estrutural.

A vantagem do concreto leve decorre, como o próprio nome o indica, de sua leveza, inferior à densidade de 1,8 contra 2,40 da densidade do concreto normal, permitindo ao calculista uma economia de dimensões dos elementos estruturais, devido ao menor peso próprio da construção.

O agregado leve é feito habitualmente a partir de matérias-primas cerâmicas especiais — argilas termo-expansivas — que têm a propriedade de aumentar de volume quando sujeitas a um tratamento térmico de calcinação.

Essas argilas especiais não são muito

abundantes. Em pesquisa recente realizada no Estado de São Paulo foram encontradas somente duas áreas de ocorrência de argila termo-expansiva: uma área próxima a Jundiá onde já existe uma fábrica de "agregado leve" comercializado com o nome de CINASITA e outra área no Vale do Paraíba.

Além do "agregado leve" comercial, fabricado a partir de argilas, ocorrem "agregados leves naturais" que consistem de rochas vesiculares — "pedras pomes" e "lavas vulcânicas". Esses "agregados leves naturais" ocorrem com certa abundância no sul dos E.U.A. e em certas faixas da Cordilheira dos Andes, utilizadas pelos Incas nas construções milenares dos seus templos e pirâmides.

A literatura técnica classifica também como tipos especiais de "agregado leve" aqueles feitos a partir de cinzas volantes, subproduto de usinas termoelétricas, bem como de escórias expandidas como subprodutos de usinas metalúrgicas ("marcas comerciais" "Way-lite" e "Celocrete").

II — MATÉRIA-PRIMA ALTERNATIVA

A Divisão de Tratamento de Minérios do IPT iniciou uma pesquisa pioneira, experimentando o "lodo digerido" da Estação de Tratamento de Esgotos de Pinheiros (São Paulo) como matéria-prima alternativa para a produção de "agregado leve".

Foi feito um estudo sistemático desse resíduo urbano que levou à obtenção de um material granulado, caracterizado e classificado dentro das especificações de "agregado leve" padrão ASTM, para fins de construção

civil. A experiência de escala de laboratório foi ampliada para uma escala piloto, estando em curso estudo de viabilidade técnica para aplicação daquele material em escala semi-industrial.

III — CARACTERIZAÇÃO DO “LODO DIGERIDO”

O lodo digerido da Estação de Tratamento de Pinheiros apresentou os seguintes resultados, decorrentes dos estudos analíticos de caracterização.

Análise química:

— Sobre o material original:	
umidade média	70%
— Sobre o material seco:	
matérias voláteis	46,7 %
carbono fixo	10,5 %
cinzas	42,8 %
— Sobre as cinzas:	
SiO ₂	51,74%
Al ₂ O ₃	26,58%
MgO	1,76%
Fe ₂ O ₃	6,51%
P ₂ O ₅	1,69%
MnO	0,24%
CaO	4,57%
Na ₂ O	0,37%
K ₂ O	1,33%
Cu	0,08%
Co	0,01%
Ni	0,04%
Cr	0,21%
Mo	0,05%
Pb	0,05%
Ba	traços
S (em SO ₃)	1,92%
Perda a 950°C com respeito a cinzas de 550°C	3,00%

IV — ETAPAS DO PROCESSO DE TRANSFORMAÇÃO DO “LODO DIGERIDO” EM “AGREGADO LEVE”

O processamento industrial está esquematizado na Planta mostrada no Anexo 1, e que consiste na seguinte seqüência de “Operações Unitárias”.

a) Pré-secagem do lodo: em leitos de secagem ao ar (7 a 10 dias) ou em túneis de secagem (quatro horas) com aproveitamento de calor dos gases de saída.

lodo inicial: 70% de umidade.

lodo pré-secado: 64% de umidade.

b) Conformação de segmentos cilíndricos de lodo extrudado.

Realizado em maromba vertical de tipo especial com saída do material em paredes

e fundo de tela metálica provida de furos cônicos, acoplada a raspadores automáticos.

c) Pelotização. O “lodo extrudado” é a seguir pelotizado com a ajuda de adição dos finos de sinterização reciclados; “sprays” de água permitem manter as pelotas ao mesmo nível inicial de umidade.

d) Secagem das pelotas. As pelotas de lodo contendo 64% de umidade são secadas em secadores com passagem de gases quentes até alcançarem o nível de umidade de 15%. É possível o aproveitamento dos gases de saída dos aparelhos de sinterização.

e) Sinterização das pelotas. As pelotas são então submetidas a uma calcinação sinterizante realizada em aparelhos de sinterização de tipo contínuo ou intermitente, de acordo com a escala de produção. A calcinação sinterizante das pelotas é iniciada por meio de queimador a gás ou óleo e continuada pela auto-combustão das pelotas, consumindo o seu conteúdo de material orgânico e combustível.

O consumo energético da pré-ignição não atinge 5% do balanço térmico do processo, cerca de 20 a 40.000 Kcal/t de agregado. O balanço térmico global do processo é de 700.000 Kcal/t de agregado.

f) Quebramento do sinter. O sinter obtido nas máquinas ou aparelhos de sinterização é quebrado após a descarga ou em operação simultânea à descarga no caso de processo contínuo. O quebrador consiste num rotor cilíndrico motorizado provido de espículas ou barras de ferro de forma serrilhada.

g) Estabilização do sinter. O sinter uma vez quebrado sobre grade de ferro, em pedaços menores que 10 cm (4”), é alimentado em tambores rotativos onde sofrem o efeito de degradação por quedas sucessivas e abração recíproca. O sinter assim “estabilizado” mecanicamente é descarregado e encaminha para um sistema classificador de peneiras.

h) Classificação dimensional do sinter. Realizada em um ou mais sistemas de peneiras vibratórias de 3 planos superpostos, providas de oscilador mecânico e acopladas a um dispositivo de execução dos finos em suspensão. Cada sistema de peneiras produz três frações granulares: a fração grosseira é novamente retornada ao efeito dos “quebradores”; fração fina encaminhada aos discos pelotizadores; a fração dimensional intermediária corresponderá ao produto classificado que comporá o produto final — agregado leve.

i) Análise de qualidade. O produto final é testado para verificar seu enquadramento na especificação da qualidade.

V — CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO

O produto deve satisfazer a especificação da ASTM e suas características acham-se indicadas a seguir.

5.1 Ensaios relativos à amostra de agregado

a) Composição granulométrica

Esta determinação obedeceu ao MB — 7 da ABNT, com a inclusão da peneira de designação ABNT 12,5 mm (EB — 22) conforme estabeleceu os projetos de especificações brasileiras de agregados leves (P — EB — 228, P — EB — 229 e P — EB — 230 de 1969 da ABNT). Os resultados foram os seguintes:

Peneiras (abertura em mm)	Material retido (g)	Porcentagens retidas em peso (%)	
		Individuais	Acumuladas
25	53	1	1
19	518	6	7
12,5	1711	21	28
9,5	1300	16	44
4,8	2346	28	72
2,4	1836	22	94
1,2	271	3	97
0,6	46	1	88
0,3	20	0	98
0,15	25	0	98
0,15	125	2	100
total	8251	100	608

Diâmetro máximo: 25 mm Módulo de finura: 6,08

b) Peso Unitário

Atendendo aos P-EB-228, P-EB-229 e P-EB-230, a determinação baseou-se no método ASTM Designation: C 29/1971: "Standard Method of Test for Unit Weight of Aggregate", preenchendo manualmente o recipiente cilíndrico com auxílio de concha, estando o agregado na condição de seco em estufa (100 a 120°C) até constância de peso.

O resultado obtido foi de 570 Kg/m³.

Obs.: Os projetos de especificações acima referidos exigem que o peso unitário de agregado no estado seco e solto não deve superar os limites de 880 kg/m³, 1040 kg/m³ ou 1120 kg/m³, em função da sua graduação granulométrica.

c) Impurezas orgânicas (MB-10 da ABNT)

Intensidade de cor da solução que esteve em contato com a amostra de agregado: inferior à da solução padrão.

Obs.: Segundo os projetos P-EB-228 e P-EB-230, o agregado leve que, ao ser submetido ao ensaio para avaliação das impurezas orgânicas, der origem a uma solução de cor mais escura que a padrão, deverá ser rejeitado, a não ser que fique demonstrado que a alteração de cor seja devida a pequenas quantidades de ma-

teriais não nocivos ao concreto.

d) Torrões de argila (MB-8 da ABNT)

O resultado obtido foi de 1,3%.

Obs.: De acordo com os projetos P-EB-228 e P-EB-230, a quantidade de torrões de argila não deverá exceder 2%.

e) Perda ao fogo: 1,59%

Obs.: Segundo o projeto P-EB-228/1969 da ABNT, o teor de perda ao fogo de agregados de cinzas não deverá ser maior que 35%, e o de outros agregados não maior que 5%. Para o P-EB-230/1969 da ABNT, a perda ao fogo do agregado leve não deverá ser superior a 5%. Ambos os projetos solicitam que seja dada atenção ao tipo de material quando for avaliado o produto do ponto de vista da perda ao fogo.

5.2 Ensaios em pasta de consistência normal

a) Quantidade de água necessária para obter a pasta de consistência normal (MB-1 da ABNT) 26,8% em relação ao peso do cimento.

b) Tempo de início de pega (MB-1 da ABNT): 3h35m.

Obs.: A EB-1/1973 da ABNT exige que o início de pega deve verificar-se no mínimo, 1 h após o lançamento da água de amassamento.

c) Estabilidade de volume

Método das agulhas de La Chatelier

Expansão a frio: 0,0 mm

Expansão a quente: 0,0 mm

Obs.: Segundo a EB-1/1973 da ABNT as expansões a frio e a quente da pasta de consistência normal não podem exceder o limite de 5 mm.

Ensaios em autoclave (P-MB-347 da ABNT)

Expansibilidade em autoclave: 0,23%

Obs.: De acordo com a ASTM Designation: C 150/1974, a expansão máxima em autoclave deve ser de 0,80%.

5.3 Ensaios em argamassa de consistência normal (MB-1 da ABNT)

a) Quantidade de água necessária para obter a argamassa de consistência normal: 0,477 g de água por grama de cimento.

b) Resistência à compressão

Corpo de prova n.º	Resistência à compressão axial, em Kgf/cm ² , nas idades de		
	3 dias	7 dias	28 dias
1	203	280	383
2	203	273	373
3	199	275	371
4	194	286	367
5	195	281	372
6	189	279	378
Média	197	279	374

AGREGADO LEVE

Obs.: A EB-1/1973 da ABNT estabelece que a resistência média à compressão axial de seis corpos de prova de argamassa normal não deve ser inferior aos seguintes limites, em Kgf/cm².

idade (dias)	Tipo 250	Tipo 320	Tipo 400
3	80	100	140
7	150	200	240
28	250	320	400

5.4 Estudo em concreto hidráulico

Com os materiais referidos no item 2, estando o agregado leve na condição de seco em estufa (100 a 120°C) até constância de peso preparam-se em betoneiras de eixo inclinado, misturas experimentais, em peso, de concreto de consistência sensivelmente igual (3,5 a 4,0 cm de abatimento no tronco de cone, de acordo com o MB-256 da ABNT), com as quais foram moldadas, pelo método manual do MB-2 da ABNT, trinta e seis corpos de prova cilíndricos, de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura: e dezesseis corpos de prova prismáticos de 50 x 50 x 286 mm³, preenchendo-os em duas camadas e adensando-as manualmente com soquete metálico, de base quadrada até a obtenção de corpos de prova homogêneos.

Mantiveram-se os corpos de prova em câmara úmida durante 24 h, procedendo-se então à sua desforma.

Os corpos de prova cilíndricos destinaram-se à determinação da massa específica aparente e da resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias de idade. Após a desforma, os corpos de prova cilíndricos permaneceram em câmara úmida até o sétimo dia e, a partir daí, em câmara de 23 ± 2% de umidade relativa. de 50 ± 2% de umidade relativa.

Dos corpos de prova prismáticos oito destinaram-se ao ensaio de pipocamento, iniciado 24 h após a moldagem. Os restantes oito corpos de prova prismáticos destinaram-se à determinação da retração por secagem, permanecendo em câmara úmida até o sétimo dia e, em seguida, em câmara de 23 ± 1,1°C de temperatura e de 50 ± 2% de umidade relativa.

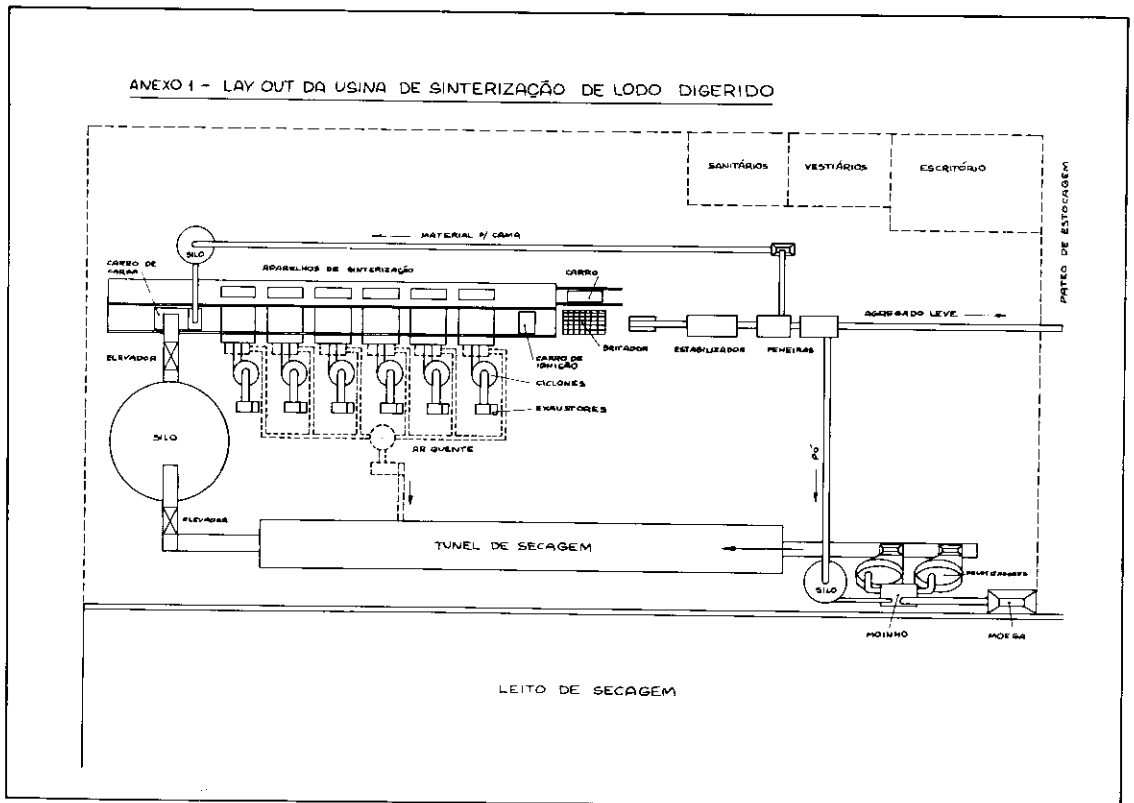
A massa específica aparente dos corpos de prova endurecidos foi determinada pelo método da balança hidrostática, calculando-a pela expressão:

$$\text{massa específica aparente} = \frac{M_a}{M_a - M_i}$$

M_a = massa do corpo de prova ao ar.

M_i = massa do corpo de prova imerso em água à temperatura ambiente.

As resistências à compressão axial e à tração simples por compressão diametral foram determinadas através dos métodos MB-3



e MB-212 da ABNT, respectivamente.

A determinação do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson estáticos à compressão baseou-se no método ASTM Designation: C 469/1970: "Standard Method of Test for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression".

Para o ensaio de pipocamento, submetem-se os corpos de prova prismáticos a tratamento térmico sob pressão, de acordo com o P-MB-347 da ABNT, efetuando-se, em seguida, exame visual quanto à ocorrência de pipocamento em sua superfície.

A determinação da retração por secagem foi através de medidas vinculadas ao comprimento dos corpos de prova, em equipamento conforme a "ASTM Designation: C 490-74: Standard Specification for Apparatus for Use in Measurement of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete", e determinando-se as diminuições de comprimento em relação à medida anotada na idade de 7 dias, em porcentagem do comprimento inicial efetivo dos corpos de prova, igual a 10 in.

Os resultados obtidos constam da tabela seguinte:

ESTUDO EM CONCRETO HIDRÁULICO

Determinações

	Misturas			
	I	II	III	IV
Traço em peso:				
a) Cimento: Agregado total				
b) Cimento Portland comum "Santa Rita"				
Areia lavada do Rio Tietê	1,00:2,00	1,00:3,00	1,00:4,00	1,00:5,00
Agregado leve resultante da sinterização de lodo de esgoto digerido	1,00	1,00	1,00	1,00
Relação nominal água/cimento (kg/kg)	1,25	2,00	2,75	3,50
Consumo aparente de cimento (kg de cimento por m ³ de concreto)	0,75	1,00	1,25	1,50
	0,45	0,65	0,90	0,97
	555	410	310	260
Massa específica aparente (kg/m ³):				
— do concreto fresco				
— do concreto endurecido, 7 dias	1.924	1.914	1.833	1.823
nas idades de 28 dias	1.903	1.888	1.848	1.839
	1.884	1.845	1.776	1.770
Tensão de ruptura à compressão axial, em Kgf/cm ² , nas idades de:				
2 dias (média de 2 corpos de prova)	241	155	90	78
28 dias (média de 3 corpos de prova)	290	203	142	109
Tensão de ruptura à tração por compressão diametral, em Kgf/cm ² , na idade de 28 dias (média de 2 corpos de prova)	24	19	14	12
Módulo de elasticidade estático, na compressão axial, em Kgf/cm ² , na idade de 28 dias (média de 2 corpos de prova):	230.000	185.000	155.000	145.000
Coeficiente de Poisson estático, na compressão axial (média de 2 corpos de prova):	0,12	0,14	0,16	0,19
Retração por secagem na idade de 28 dias (%) (média de 2 corpos de prova):	0,034	0,050	0,055	0,062
Pipocamento (ensaio em 2 corpos de prova por mistura):	Não ocorreu pipocamento na superfície dos corpos de prova.			

VI — ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

6.1 Viabilidade Técnica

Os resultados obtidos na caracterização do agregado leve resultante da sinterização do lodo de esgoto digerido podem ser considerados como indicadores de um desempenho satisfatório na preparação de concretos hidráulicos.

6.2 Viabilidade Econômica

Foi calculada uma estimativa do custo unitário numa usina piloto para a produção de 2.000 kg/h (3,5 m³) de agregado a partir de lodo digerido (Vide anexo 1).

Conforme o estudo realizado, o custo de Cr\$ 57,58 por m³ de agregado (cerca de US\$ 7,00), no caso de três turnos de trabalho, mostra a viabilidade econômica do processo uma vez que o metro cúbico de agregado leve no Brasil é vendido a Cr\$ 120,00 (cerca de US\$ 13,00) posto usina.

VII — PROSSEGUIMENTO DOS ESTUDOS

Os resultados ora obtidos na escala de 280 kg/h de produto final ou cerca de 1.400 kg de lodo processado por hora, terão prosseguimento com o levantamento dos parâmetros para detalhar projeto de uma usina semi-industrial de capacidade para 2 toneladas ho-

rárias de produto final ou 12 toneladas de lodo digerido por hora (70% de umidade).

Serão também feitos estudos de caracterização do agregado, envolvendo as frações miúda e graúda, cujas composições granulométricas atendem às exigências dos projetos de especificações brasileiras de agregado leve.

VIII — ASPECTOS ECONÔMICOS

Para facilitar uma apreciação econômica, suponhamos uma instalação para aproveitamento do lodo digerido, correspondente a uma instalação de Tratamento de Esgoto com capacidade para tratar cerca de 20.000 m³ horários de água residuária. Do aproveitamento do resíduo sólido resultará cerca de 2 t horários de agregado leve que é o produto final de processamento sem prejuízo do possível aproveitamento de água.

8.1 Mão-de-obra envolvida

A mão-de-obra operacional, inclusive a empregada na manutenção e na administração, está avaliada em 5,6 Hxh/t para instalações de pequeno porte. Para a produção de 1.200 t mensais de agregado leve, corresponderá a uma equipe de cerca de 30 homens, sendo 10 homens por turno de 8 horas. Para produções maiores que 5000 t mensais de agregado leve

a produtividade aumenta sensivelmente baixando para 3 Hxh/t, a estimativa da mão-de-obra operacional.

8.2 Energia

Avalia-se em cerca de 35 Kwh/t a energia utilizada na instalação industrial correspondendo ao nível de produção em 3 turnos de 8 horas de 1.200 t mensais de agregado leve.

A potência instalada dessa unidade industrial atinge cerca de 200 HP.

8.3 Custo de produção

Sem levar em conta o custo inicial da matéria-prima — lodo digerido — que pode ser considerado como de valor positivo ou negativo conforme se considere necessário ou não o custo da disposição daquele resíduo, o custo de produção correspondente ao processamento pode ser estimado em cerca de 7 dólares ou 60 cruzeiros, aproximadamente, por m³ de agregado leve.

8.4 Custo de investimento

Para instalações de pequeno porte de 1 t/h, até 5 t/h, o custo estimado é de 15 dólares/t.a.

Para maiores capacidades o custo descerá gradualmente para 10 dólares ou menos, ao atingir a produção específica dos aparelhos contínuos de secagem e de sinterização com mais de 10 t/h, sendo o ideal considerar-se capacidades de produção acima de 20 t/h.

8.5 Viabilidade financeira

Uma instalação para produção de 1.200 t mensais custará portanto menos de 3 milhões de cruzeiros, correspondendo a um faturamento mensal acima de Cr\$ 250.000,00 e uma renda bruta de Cr\$ 125.000,00 ou seja 4,16% ao mês como taxa de retorno do capital.