AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ALUMÍNIO NA FABRICAÇÃO DE ARGILA
EXPANDIDA

ELISA AKIKO NAKANO TAKAHASHI

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Materiais

Orientadora:

Prof^a Dra. Eliana Navarro dos Santos
Muccillo

São Paulo
2006

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ALUMÍNIO NA FABRICAÇÃO DE ARGILA
EXPANDIDA

ELISA AKIKO NAKANO TAKAHASHI

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Materiais

Orientadora:
Prof^a Dra. Eliana Navarro dos Santos
Muccillo

São Paulo
2006

Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu pai (in memoriam), que muito batalhou para que pudéssemos estudar.

Agradecimentos

Agradeço à minha família, em especial ao meu marido e meus filhos pela paciência e colaboração durante a execução dos trabalhos.

Agradeço ainda, à FATEC São Paulo, na figura do Dr. Dirceu D'Alkmin Telles, diretor da faculdade, para que este trabalho pudesse ser realizado.

Aos Departamentos de Edifícios, Hidráulica e Transporte de Obras e Terra e seus funcionários que contribuíram na realização do trabalho, quando da utilização de seus laboratórios e na colaboração de seus funcionários em sempre atender aos meus pedidos.

Aos professores das disciplinas de pós-graduação que muito me ajudaram no desenvolvimento da pesquisa.

Ao prof. Dr. Flávio Machado de Souza Carvalho do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo pela realização dos ensaios de difração de raios X.

Ao IPEN pela realização dos ensaios de micrografia, análise granulométrica e análise térmica, não posso citar todos os nomes, pois poderia esquecer de alguém, mas em nome da Renata, na época, aluna de doutorado, agradeço a todos que possibilitaram o desenvolvimento de meu trabalho.

Ao Ariovaldo Nuvolari que sempre me atendeu, mesmo nas minhas dúvidas mais absurdas. Ao professor Dr. Carlos Espíndola pela colaboração.

Não posso deixar de fazer um agradecimento especial à minha orientadora, professora Doutora Eliana Navarro dos Santos Muccillo que sempre me ajudou no desenvolvimento dos trabalhos e também compreendeu as minhas

dificuldades.

A todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho. E àqueles que agora me falham na memória.

UTILIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ALUMÍNIO NA FABRICAÇÃO DE ARGILA EXPANDIDA

Elisa Akiko Nakano Takahashi

RESUMO

O presente trabalho estuda a viabilidade de utilização da escória de alumínio, que é um rejeito da indústria recicladora de alumínio, atualmente sem valor agregado, como elemento integrante na fabricação de argila expandida. A argila expandida é produzida a partir de argilas que produzam expansão piroplástica, que são utilizadas como agregado leve na fabricação de concreto estrutural e também como artigo decorativo em jardins. Inicialmente foram feitas análises dos materiais de partida, como difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura, fluorescência de raios X, análise granulométrica, análise termogravimétrica e análise térmica diferencial da argila. Foram feitas incorporações do rejeito junto à massa de argila, na proporção de 5%, 10%, 15% e 20% em massa. As formulações estudadas foram analisadas quanto à expansão linear, variação de massa, massa específica aparente e absorção de água. Foram feitos também ensaios de lixiviação e solubilização. Os principais resultados obtidos mostraram que é viável o uso da escória de alumínio até aproximadamente 5% em massa, para a produção da argila expandida, com características aceitáveis e dentro das normas vigentes.

Palavras-chave: reciclagem, escória de alumínio, argila expandida, agregado leve.

APPLICATION OF ALUMINUM SLAG INCORPORATED IN LIGHWEIGHT AGGREGATE

Elisa Akiko Nakano Takahashi

The use of industrial waste materials as additives in the manufacture of ceramic product has been attracting a growing interest in the last few years and is becoming common practice. The main purpose of this work is to evaluate the possibility of incorporation of aluminum slag into clay materials. Expansive clays are obtained from a pyroplastic expansion, and are usually employed like lightweight aggregate in structural concrete as ornamental garden products. The characterization of the aluminum slag and clay materials was carried out by X-ray fluorescence spectrometry, X-ray diffraction, granulometry, differential thermal analysis, thermal gravimetry (DTA and TG) and scanning electron microscopy. The studied compositions contained 5, 10, 15 and 20 weight% of aluminum slag into clay mass. The linear expansion, mass variation, apparent specific mass and water absorption of all compositions were determined. Leaching and solubilization experiments were also performed. The main results show the viability of using up to 5wt% aluminum slag for producing expansive clays with characteristics within the accepted standards.

Key-words: recycling, aluminum slag, expansive clay, lightweight aggregate.

SUMÁRIO

	Página
INTRODUÇÃO	1
OBJETIVO	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1. Histórico	8
2.1.1. Argila expandida	8
2.1.2. A reciclagem de alumínio	11
2.2. Qualidade na Construção Civil	15
2.3. Desperdício e Geração de resíduos	17
2.4. Escória de alumínio como Rejeito Industrial	28
2.5. O profissional e a Geração de Resíduos	30
2.6. Reciclagem e os Investimentos	31
2.7. Os incentivos à reciclagem	32
2.8. Pesquisas sobre reciclagem	34
2.9. Conclusão	35
METODOLOGIA	37

3.1. Materiais	37
3.1.1. Argila	37
3.1.2. Escória de alumínio	38
3.2. Métodos	38
3.2.1. Argila e escória de alumínio	38
3.2.2. Argila com incorporação da escória de alumínio	38
3.2.2.1. Confeção dos corpos de prova	38
3.2.2.2. Ensaio de massa específica e expansão piroplástica	38
3.2.2.3. Ensaio de absorção de água	39
3.2.2.4. Ensaio de Solubilização e Lixiviação	40
3.2.2.5. Ensaio de resistência à compressão	41
3.2.3. Espectrometria por fluorescência de raios X	42
3.2.4. Distribuição granulométrica por espalhamento de um feixe de laser	42
3.2.5. Difração de raios X	42
3.2.6. Microscopia eletrônica de varredura	43
3.2.7. Análise térmica diferencial e termogravimétrica	43
RESULTADOS	45

4.1. Escória de alumínio	45
4.2. Argila	46
4.3. Argila com incorporação da escória de alumínio	52
4.3.1. Ensaio de absorção de água	54
4.3.2. Ensaio de lixiviação e solubilização	57
4.3.3. Ensaio de resistência à compressão	58
DISCUSSÃO	60
CONCLUSÃO	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A construção civil necessita de materiais existentes na natureza para que uma edificação se realize.

Face ao crescimento populacional, faz-se necessário que novas cidades, e nelas, habitações sejam construídas. A necessidade crescente de materiais para as novas construções e, conseqüentemente, a diminuição de recursos naturais, é uma preocupação do mundo atual (1).

Segundo Zordan (2) a partir do final do século passado até os dias atuais e com o mundo globalizado e os novos conceitos de administração e gerenciamento que têm sido implantados nas mais diversas empresas, é preciso pensar sob o ponto de vista de preservação do meio ambiente.

Ambientalistas, sociólogos, ecologistas, dentre outros profissionais têm se preocupado com o crescimento apesar de desacelerado da população, do consumo excessivo e a uma economia globalizada. Os impactos socioambientais que vão desde fome, miséria, desigualdade, violência e desemprego às reações adversas da natureza que por sua vez vêm castigando várias regiões em níveis globais, têm colocado o planeta no seu limite de suporte, e seu capital natural/humano acaba sofrendo profunda alteração (3).

Em 1992, realizou-se no Rio de Janeiro, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), conhecida como ECO 92, cujo objetivo principal, foi discutir a respeito dos recursos provenientes da natureza, a emissão de gases na atmosfera, a preocupação com o meio ambiente, tornando-se esse, um dos assuntos a serem tratados com bastante atenção (4).

A Agenda 21, estabelecida na conferência ECO 92, refere-se às preocupações com o nosso futuro, no século XXI. Ela serve de guia para as ações do governo e de todas as comunidades que procuram desenvolvimento sem com isso destruir o meio ambiente (4).

Dentro da indústria da construção civil, o conceito de qualidade e responsabilidade ambiental está sendo implantado há pouco mais de uma década (2).

Domingos (1) afirma que com a reciclagem é possível evitar que os resíduos sejam despejados em locais impróprios, contribuindo dessa forma para a redução do impacto ambiental da construção civil.

A mesma autora (1), mostra que estudos recentes comprovam que é possível utilizar produtos econômica e ecologicamente viáveis para substituir essas matérias-primas. A utilização de resíduos como as cinzas que são geradas pela queima do carvão em uma termoeletrica ou pela queima da casca do arroz são ótimas alternativas para a construção civil. Esses materiais podem ser adicionados na elaboração de concretos e argamassas para reduzir o consumo de cimento ou areia, por exemplo. Os resultados laboratoriais têm demonstrado que os materiais fabricados com resíduos possuem as mesmas características dos tradicionais e, muitas vezes, são até mais resistentes e

duráveis.

A autora ainda afirma que a substituição de minerais não renováveis, com o aproveitamento dos resíduos na produção de materiais de construção seria uma solução para o excedente dessas substâncias, resíduo esse que geralmente apresenta risco de contaminação ambiental se não for armazenado de maneira adequada pela empresa geradora (1).

Dessa forma, a construção civil estuda maneiras de diminuir o impacto ambiental associando-se às novas formas de economizar, sem se esquecer da qualidade (2).

Segundo Garlet (5), o acelerado processo de industrialização que existe em algumas regiões do país, causando uma expansão demográfica, tem acarretado um aumento considerável na geração de resíduos sólidos, particularmente no que se refere aos de origem industrial. O tratamento inadequado dos resíduos sólidos contribui de forma marcante para o agravamento dos problemas ambientais, notadamente nos grandes centros urbanos.

O conceito 3R's: reduzir, reciclar, reutilizar, começou a ganhar força no final do século passado. Segundo Maia (6), reduzir significa evitar, de todas as maneiras possíveis e imagináveis, a formação de determinado resíduo durante o desenvolvimento de certa atividade. Reutilizar significa que se depois da tentativa de redução de resíduos, ainda existir material sólido, deve-se reutilizar o mesmo, ou seja, dar um uso diferente ao mesmo. E Reciclar é processo pelo qual é possível conferir determinadas propriedades a um subproduto ou resíduo que permita a sua incorporação no processo de fabricação de novos materiais.

Atualmente no Brasil, a indústria de reciclagem, em especial a de alumínio, recicla em torno de 95% do alumínio produzido (7), valor superior ao apresentado por países industrializados como Japão e Estados Unidos, o que corresponde a 9 bilhões de latas de alumínio, equivalente a 121 mil toneladas de material. Do processo de reciclagem, surge a escória de alumínio, classificada como secundária. Este material contém alumina (Al_2O_3), o nitreto de alumínio (AlN), o espinélio (MgAl_2O_4) e o alumínio metálico (Al), e também KCl , NaCl e sílica. O teor de alumínio varia de 5 a 20% em massa (8).

A escória de alumínio secundária deve ser destinada para aterros industriais, porém esta prática nem sempre é observada, principalmente por pequenas empresas do setor, devido ao elevado custo da operação, cerca de US\$ 50,00/tonelada (8).

Garlet (5) afirma que com o advento da chamada “era ecológica”, ocorreu o surgimento de legislações ambientais mais rigorosas, obrigando o gerador dos resíduos a dispô-los de maneira adequada sem agredir o meio ambiente, fato que representou uma nova fonte de despesas.

Ainda segundo o autor, este quadro levou ao aparecimento de uma nova política no que se refere a destinação dos resíduos industriais, pois hoje as empresas se vêem obrigadas a incorporar à gestão empresarial, os processos de disposição final, minimização e reciclagem dos resíduos, com a finalidade de diminuir os custos advindos para cumprir as exigências das legislações ambientais. Dessa forma, se o gerador de resíduo encontrar uma maneira de reaproveitar ou vender os resíduos, além de solucionar o problema de deposição, poderá conseguir uma fonte de renda adicional.

Segundo Costa (9), a melhoria da qualidade do produto cerâmico

pode ser influenciada pela utilização de resíduos oriundos de diversos processos industriais. O emprego de rejeitos industriais na massa cerâmica para produção de materiais de construção, pode-se justificar por uma conceituação geral, internacionalmente reconhecida e intimamente ligada à própria expansão e sedimentação das ações, visando à preservação ambiental e ecológica do nosso planeta e a segunda, mais particular ao nosso país, diz respeito ao setor da construção civil e contempla interesses de ordem técnica e econômica. Mais adiante, Costa comenta que, ainda hoje, os resíduos são simplesmente afastados da área industrial, não havendo preocupação por parte dos geradores quanto à adequabilidade de seu destino final. É verificado ainda, que o lançamento indiscriminado de rejeitos industriais nos corpos de água ou em áreas não preparadas para esta finalidade, acabam servindo como intermediárias na devolução de poluentes aos corpos de água. O aproveitamento de rejeitos de qualquer tipo, e em particular os rejeitos industriais, deve ser encarado como uma prática preservacionista-restauradora, de elevado sentido ambiental e ecológico. Costa conclui que, por esta razão, e apenas por esta, já se justificaria a busca de utilização desses produtos nos produtos de construção civil, independentemente de outras ações simultâneas.

Como o volume de escória de alumínio também tende a crescer, em virtude da crescente reciclagem, surge a necessidade de mais áreas de descarte do material, gerando dessa forma, outro problema, a disposição correta de resíduos, preocupação essa decorrente da atual consciência ambiental.

Vários estudos têm sido realizados em que se utiliza algum tipo de resíduo industrial, ou no concreto, ou na argamassa ou em blocos

cerâmicos/concreto, podendo representar uma boa alternativa para reduzir o preço das moradias (5).

No capítulo 2 será mostrado o resultado de uma revisão bibliográfica no tema envolvendo: argila expandida, a escória de alumínio e a reutilização e a reciclagem na construção civil no país. No capítulo 3 será feita uma descrição dos materiais e dos métodos utilizados neste trabalho. Os resultados obtidos e as discussões serão apresentadas nos capítulos 4 e 5, respectivamente. Por fim, no capítulo 6 serão apresentadas as conclusões resultantes deste trabalho.

OBJETIVO

O presente trabalho teve por objetivo demonstrar a viabilidade de utilização de resíduos da indústria de reciclagem de alumínio (escória) juntamente com a indústria de fabricação de argila expandida, de maneira a reduzir a quantidade de escória de alumínio, que até o momento, não tem nenhum valor agregado, havendo inclusive um gasto adicional por parte da empresa geradora no tratamento desse material quando de seu descarte em aterro industrial.

A utilização da escória de alumínio como elemento adicional na fabricação de argila expandida teve o objetivo de incorporar um rejeito da indústria em uma massa cerâmica, uma vez que a escória contém elementos (em sua constituição) que auxiliarão na expansão da argila.

Os ensaios com incorporação de escória foram realizados com temperaturas de queima diferentes, com o objetivo de verificar a possibilidade de obter expansão do material com temperaturas menores que as usuais. As amostras foram feitas no formato esférico, com o objetivo de verificar a aplicação a uma massa de concreto, verificando a sua resistência mecânica.

CAPÍTULO 2

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Histórico

2.1.1 Argila expandida

A argila é uma rocha finamente dividida, constituída por argilominerais , podendo conter matéria orgânica, minerais e outras impurezas (10).

A argila expandida é um material obtido de argilas e folhelhos que possuem a propriedade peculiar de se expandir quando sujeitos a um processo térmico adequado, que provoque um estado semi-plástico conhecido também com “ponto de vitrificação incipiente” (10).

A descoberta da argila expandida data de 1919, quando Stephen J. Hayde registrou esse agregado artificial. Sua aplicação inicial deveu-se a utilização do aço na indústria bélica, face ao cenário político mundial. Concebido com uma determinada finalidade de uso e não para atender à necessidade da utilização de resíduos industriais, nasceu assim, a argila expandida (11). No Brasil, a sua utilização em escala industrial iniciou-se em 1968.

No ano de 1965, a empresa CINASA – Construção Industrializada Nacional pretendia pré-fabricar, em usina, peças de concreto para unidades habitacionais e para fins estruturais diversos, que permitissem a montagem de unidades de construção civil com peças pré-fabricadas. Dessa necessidade, após diversos estudos e análise de viabilidade econômica do local e de que material

poderia ser utilizado nessas peças, que substituíssem a pedra britada, surgiu a empresa de agregado leve em argila expandida (10).

Pelas características peculiares da argila expandida, ela encontra aplicações variadas em diversos campos da Engenharia (11), destacando-se:

- Concreto leve estrutural (redução de peso da ordem de 25 a 30% em relação ao concreto tradicional);
- Blocos de concreto leve (redução de 40% de peso em relação aos blocos com brita e areia);
- Isolamento térmico;
- Enchimento de vazios e regularização de pisos;
- Misturas asfálticas a quente;
- Chapisco de alvenaria;
- Concreto refratário em mistura com cimento aluminoso (isolamento refratário até 1000°C)
- Drenagem (no estado solto);
- Hidrocultura (agregado retentor de umidade)
- Mistura com gesso (moldagem de placas e painéis).

Souza Santos (10) afirma que, os processos pelos quais agregados leves são fabricados, a partir de materiais naturais, podem ser divididos em dois grupos principais. O primeiro grupo baseia-se no fato de que certas argilas, folhelhos argilosos (“shales”) e ardósias (“slates”) incham ou borbulham quando aquecidos à temperatura de fusão incipiente. No segundo grupo, a baixa massa específica aparente é obtida pela sinterização de um material granular, de tal maneira que uma estrutura sólida celular é obtida, na qual os vazios intersticiais são preservados como poros abertos ou fechados. O sólido formado pode inchar ou expandir durante a queima, mas tal fato não é fundamental para a fabricação do agregado leve. A queima é feita em fornos rotativos ou em fornos de sinterização de grelha móvel.

Segundo Riley e Wilson apud Souza Santos (10) procurou-se estabelecer uma correlação entre a composição química de argilas e folhelhos argilosos com a propriedade de inchar ou não inchar entre temperaturas de 1100°C e 1350°C. Estabeleceu-se um diagrama ternário dando os limites aproximados de composição para formar uma fase vítrea da composição adequada. Neste diagrama que está mostrado na figura 1, vê-se que as ilitas são os argilominerais que mais se aproximam dos limites estabelecidos por Riley, muito embora a maioria das argilas, folhelhos e ardósias, que incham no estado pirolástico, se achem dentro dos limites de composição estabelecidos pelos autores citados. Isto não significa que, se um material tem composição química dentro desses limites, ele irá necessariamente inchar no estado pirolástico entre 1100°C e 1350°C. O material deve possuir um mineral que libere gás nessas temperaturas para produzir o inchamento. Ainda segundo Souza Santos (10), Riley preparou misturas artificiais, que não incham, contendo caulinita, sílica e microclina, e adicionou vários minerais à mistura. Desse trabalho e outros concluiu-se que pirita, calcita, dolomita e hematita produzem o inchamento, muito embora haja dúvidas quanto à hematita, e, também, se gipsita e magnetita possam ter esse papel produtor do inchamento. A adição de óleo combustível e a presença de água parecem desempenhar um papel importante para induzir o inchamento pirolástico.

Figura 1 – diagrama ternário Riley (10)

2.1.2. A reciclagem do alumínio

A reciclagem de alumínio sempre existiu. No Brasil, começou a ganhar força por volta dos anos 80. Segundo levantamento realizado pela ABAL (Associação Brasileira de Alumínio) (7), 95,7% da produção nacional de latas foi reciclada no ano de 2004. Em 2003, esse índice era de 89%. Os números brasileiros superam países industrializados como Estados Unidos e Japão. Em 2004, os Estados Unidos recuperaram 51% de sua produção de latas. A tabela 1 apresenta os dados sobre reciclagem.

Tabela 1 – Reciclagem de latas de alumínio no Brasil – Quadro comparativo

Discriminação	2003	2004
Latas consumidas (bilhões)	9,3	9,4
Latas recicladas (bilhões)	8,2	9,0
Índice de reciclagem (%)	89	95,7
Recursos gerados (milhões de reais)	Nd	160 mil
Empregos gerados	160 mil	160 mil

Fonte Abal (7) Nd – não disponível

Tenório (12) afirma que a importância da reciclagem de alumínio tem relação direta com a economia de bauxita, matéria-prima do alumínio, e, também, com a economia de energia elétrica, uma vez que são necessários 17.000 kWh de energia elétrica para a produção de uma tonelada de alumínio a partir de sua matéria-prima, a bauxita, enquanto a mesma tonelada de alumínio é produzida por reciclagem com um consumo de cerca de 750 kWh, tendo dessa forma um ganho de 95% quando se usa alumínio reciclado.

Segundo Tenório (13), a reciclagem de alumínio tem outro aspecto positivo, pois está relacionada ao impacto ambiental. A produção de uma tonelada de alumínio primário implica o consumo de, aproximadamente, 4 toneladas de bauxita e a produção de 2 toneladas de lama vermelha (resíduo gerado durante o processo de reciclagem), além da emissão de fluoretos. A atividade de mineração da bauxita também causa distúrbios ao meio ambiente, pois implica a devastação de florestas e demanda espaços para rejeitos.

De acordo com Tenório (13), o resíduo oriundo do processo de reciclagem de alumínio para obtenção do resíduo pode ser dividido em dois grupos principais: fusão de sucatas e o tratamento de drosses (conhecido como borra ou escória). A borra é resultante do processo de fundição de alumínio. Devido à reatividade do alumínio com o oxigênio, ocorre a formação de uma

camada superficial de óxido que separa o metal líquido da atmosfera oxidante. As eventuais turbulências geradas pelo manuseio do banho líquido fazem com que haja uma nova exposição do alumínio, causando um aumento da camada de óxido. A remoção posterior dessa camada superior acarreta o arraste de alumínio juntamente com o óxido, gerando assim uma fase heterogênea chamada dross, que é constituída basicamente de óxidos, alumínio e demais impurezas que se encontrem na superfície do banho líquido.

Ainda segundo Tenório (13), a metalurgia secundária do alumínio visa recuperar o metal contido em sucatas e borras, bem como dar uma destinação aos subprodutos dessas operações.

O mesmo autor (13) afirma ainda que o processo para fusão de sucatas é normalmente feito em fornos rotativos ou, em menor escala, em fornos a cadinho e, nessa operação, são usados eventualmente fluxos protetores e eliminadores de inclusões. O volume desses fluxos não ultrapassa 2% do volume da carga, passando o metal fundido para o lingotamento ou para fornos de manutenção e a borra é armazenada em recipientes de aço ao lado dos fornos. Quando se trabalha com sucatas de baixa espessura (por exemplo, cavacos ou latas de bebidas) ou ainda sucatas contendo revestimentos orgânicos, é comum o uso de frações de sais fundidos acima de 2%. A borra ou escória é classificada em dois tipos: dross branca (“white dross”) e a dross preta (“black dross” ou “salt cake”). A primeira é proveniente da metalurgia primária, unidades de extrusão, unidades de laminação e fundições. O que caracteriza essas drosses é a ausência de fluxos salinos e o fato de terem uma coloração clara, branca ou cinza. Podem conter de 15% a 70% de alumínio na forma metálica. A dross preta, que se caracteriza pela coloração escura é resultante da metalurgia secundária

na qual se utilizam fluxos salinos.

O material utilizado nesta pesquisa, a escória de alumínio é proveniente do processamento de reciclagem. Classificada como secundária, este material contém alumina (Al_2O_3), nitreto de alumínio (AlN), espinélio (MgAl_2O_4) e alumínio metálico (Al), e também KCl , NaCl e sílica. O teor de alumínio variando de 5 a 20% em peso (8).

Segundo Araújo (8), as empresas recicladoras de alumínio não têm interesse em reaproveitar todo o alumínio presente na escória secundária, uma vez que há a necessidade de eliminar, de maneira ambientalmente correta, os sais presentes nela, o que encareceria o seu reaproveitamento.

O trabalho de Cruz e Bender trata da reciclagem do alumínio pelo uso do forno a plasma, existente no IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas). A reciclagem do alumínio é feita através do forno a plasma, com aproveitamento do alumínio disponível para recuperação e sem o inconveniente da geração de agentes poluidores (14).

A utilização de escória de alumínio como agente expensor teve a sua primeira utilização junto à massa de cimento, cal e areia para produção de bloco de concreto celular. Essa utilização teve como princípio a fabricação de blocos de concreto celular autoclavado (BCCA), que se utiliza de pó de alumínio em adição à massa de cimento, cal e areia em autoclave. O pó de alumínio é utilizado devido a liberação do gás hidrogênio, responsável pela formação dos poros da estrutura celular. Araújo estudou a substituição do pó pela escória de alumínio face ao custo do pó de alumínio, que é elevado, em torno de US\$ 5,00/kg, e a escória de alumínio, que não possui custo, já que é considerada um material de rejeito industrial (8).

2.2. Qualidade na Construção Civil

Zordan (2) afirma que a indústria da construção civil sempre foi caracterizada pela carência de qualidade em seus produtos e por uma filosofia altamente esbanjadora e que os administradores do setor tivessem por dever, sempre aperfeiçoar recursos e, portanto, minimizar perdas. Os resíduos produzidos pela construção, nem sempre foram considerados uma variável importante na equação dos orçamentos. Tanto no Brasil, como em outros países, tais resultados sempre acabaram influenciando no custo da construção.

Picchi apud Zordan (2) afirma que a construção civil absorveu mais tardiamente os conceitos e metodologias da qualidade, que surgiram, via de regra em indústrias seriadas, tais como mecânica e eletrônica, que possuem décadas de evolução nestes setores, e agora há uma preocupação com a concorrência e também influenciada pelo intenso movimento mundial na busca pela competitividade, o setor começou a perceber a necessidade de uma avaliação dos métodos e técnicas que há muito tempo vêm sendo empregados pela construção civil. Dessa forma, mesmo que atrasado, o construtor brasileiro começa a incluir na sua lista de objetivos, temas que abordam a qualidade.

O Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade (PBQP) foi criado em 1990 com a finalidade de difundir novos conceitos de qualidade, gestão e organização da produção, tendo em vista contribuir para a modernização e competitividade das empresas brasileiras. Foi reformulado a partir de 1996, para ganhar maior agilidade e abrangência setorial e tem envolvido, em suas ações, vários setores da sociedade (15).

Em 1997, dada a necessidade de uma união maior com o setor privado

na produção habitacional, compatível com o cenário político, econômico e social do final daquela década, a Secretaria de Política Urbana do Ministério do Planejamento e Orçamento assumiu a responsabilidade de estruturar e coordenar a operação do PBQP-Habitat (Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade – Habitat) (16).

O PBQP-Habitat preocupa-se com o peso das características regionais na concepção; os ajustes impostos na fase prática da execução, e as experiências obtidas e acumuladas a partir das parcerias com as empresas construtoras e os fornecedores de materiais e insumos (15).

Os objetivos do PBQP-H são: elevar os patamares da qualidade e produtividade da construção civil, por meio da criação e implantação de mecanismos de modernização tecnológica e gerencial, contribuindo para ampliar o acesso à moradia para a população de menor renda; estimular o inter-relacionamento entre agentes do setor; promover a articulação internacional com ênfase no Cone Sul; coletar e disponibilizar informações do setor e do PBQP-H; fomentar a garantia da qualidade de materiais componentes e sistemas construtivos; fomentar o desenvolvimento e a implantação de instrumentos e mecanismos de garantia da qualidade de projetos e obras; estruturar e animar a criação de programas específicos visando a formação e a requalificação de mão-de-obra em todos os níveis; promover o aperfeiçoamento da estrutura de elaboração e difusão de Normas Técnicas, códigos de práticas e códigos de edificações; combater a não conformidade intencional de materiais, componentes e sistemas construtivos; apoiar a introdução de inovações tecnológicas; promover a melhoria da qualidade de gestão nas mais diversas formas de projetos e obras habitacionais (16).

2.3. Desperdício e Geração de resíduos

Segundo Kraemer (17), a população do planeta aumentou 18%, porém a quantidade de lixo sobre a Terra passou a ser 25% maior.

Segundo Domingos (1), a quantidade de entulho gerado após o término da obra, tais como restos de madeira, concreto, argamassa, caixas de papelão, embalagens plásticas, latas de tinta, pedaços de blocos e de tijolos. Todo esse lixo surge porque há desperdício de materiais nas obras, material esse que acaba sendo despejado em aterros, terrenos baldios, em córregos e até mesmo em ruas e avenidas.

A necessidade do homem de se utilizar de materiais para que pudesse construir sua moradia data de milhões de anos. A utilização de materiais provenientes da natureza ocorre há mais de 10 mil anos. Esses materiais utilizados como matérias prima eram de recursos minerais não renováveis de origem natural. Este modelo não representava problemas, pois havia recursos naturais em abundância e também a população atendida era pequena (1).

Segundo John *apud* Ângulo *et al* (18) com a crescente industrialização, o advento de novas tecnologias, o crescimento populacional, o aumento de pessoas em centros urbanos e a diversificação do consumo de bens e serviços, os resíduos acabaram se transformando em graves problemas urbanos com um gerenciamento oneroso e complexo com volume e massa acumulados, principalmente após 1980. Os problemas se caracterizavam por escassez de área de deposição de resíduos causadas pela ocupação e valorização de áreas urbanas, altos custos sociais no gerenciamento de resíduos, problemas de saneamento público e contaminação ambiental. Como Ângulo (18) afirma, é devido ao próprio desenvolvimento da humanidade que problemas começaram a

surgir. O resíduo gerado pela construção civil tornou-se um problema devido a uma destinação inadequada. O material acaba sendo despejado em aterros, em terrenos baldios, em córregos e até mesmo em ruas e avenidas, ou mesmo a queima de materiais possíveis é realizada, com o grave inconveniente de poluição do ar.

Quanto à geração de resíduos sólidos urbanos e aos industriais, a preocupação sobre o tema pode-se dizer recente para a realidade do Brasil. Somente na década de 90 é que ela tomou a sua devida importância, tal fato também ocorreu nos Estados Unidos no final da década de 80, quando foi instaurado o “Superfund”, que era uma legislação específica que visava recuperar os grandes lixões de resíduos sólidos que havia e ainda há espalhados nos Estados Unidos. Essa geração de resíduos nos Estados Unidos deve-se ao fato do estilo “american way of life” que associou a qualidade de vida ao consumo de bens materiais. Este padrão de vida alimenta o consumismo, acaba incentivando a produção de bens descartáveis e difunde a utilização de materiais artificiais (17).

Existe uma preocupação muito forte na Europa, onde a recuperação e o reaproveitamento energético dos resíduos são sempre levados em consideração. Como exemplo, pode-se citar a indústria de alumínio, na qual 99% dos resíduos de produção são reutilizados e na indústria de plástico esse percentual gira em torno de 88% (17).

Da geração de resíduos sólidos, no Brasil, 90% do volume deste material é destinado a aterros e/ou lixões e somente 10% é destinado à reciclagem e/ou compostagem. Nos países europeus a preocupação com a destinação dos resíduos sólidos é mais marcante, a Suécia, por exemplo, destina

10% de seus resíduos para aterros e/ou lixões, 50% são incinerados e 40% são destinados a reciclagem e/ou compostagem (7).

Segundo dados da ABETRE (Associação Brasileira das Empresas de Tratamento de Resíduos), apenas 22% dos resíduos industriais gerados têm destinação correta, sendo que 16% desses resíduos vão para aterro, 1% é incinerado e 5% é co-processado, transformando-se em combustível para a indústria de cimento. E os restantes 78% são despejados de maneira irregular. Ainda em seu levantamento, anualmente são gerados cerca de 3 milhões de toneladas de resíduos industriais (19).

Segundo John e outros (2004) (20), deve-se avaliar os custos associados à prática atual de gestão de resíduos, uma vez que são parte fundamental na avaliação da viabilidade econômica da reciclagem e no interesse do gerador em desenvolvimento de alternativas de reciclagem.

Mesmo nos EUA, um estudo da EPA (“Environmental Protection Agency”) mostra que grande parte das empresas não realiza apropriação direta dos custos ambientais, especialmente porque os sistemas de contabilidade não prevêm esta prática (20).

Este estudo indica que os custos ambientais podem chegar até 20% dos custos totais e, geralmente, estão alocados junto a custos de produtos e processos em algum departamento. Não são considerados os custos de contingência para eventuais atividades de reparação de áreas de deposição, multas ambientais, entre outras. Os custos de embalagem, tratamento, transporte, licenciamento ambiental etc, são parte dos custos diretos de deposição de resíduos em aterros. Existem os custos indiretos, como o desgaste da imagem da empresa que polui o ambiente ou uma gestão ambiental ineficiente, que pode

gerar confronto com organizações sociais e perda de consumidores. Esse é um outro fator que pode determinar o interesse por uma tecnologia de reciclagem (20).

Atualmente, no município da cidade de São Paulo, o montante de resíduos gerados pela construção civil é de 15.000 ton/dia (21). Os aterros destinados para recebimento desses materiais encontram-se praticamente esgotados. Em virtude do grande volume de entulho gerado, da falta de área de descarte em um futuro próximo, da falta de hábito da população em dar destinação correta aos resíduos e do desperdício de dinheiro público nesse quesito, a Prefeitura está implantando o plano de Gestão Sustentável de Entulho, que tem como diretrizes:

- Facilitar o descarte de resíduos da construção civil e volumosos;
- Disciplinar as pessoas envolvidas e fluxos de resíduos;
- Valorizar e reaproveitar o entulho.

O resíduo da construção civil é muitas vezes gerado por deficiências no processo da construção, como falhas ou omissões na elaboração dos projetos e na sua execução, pela má qualidade dos materiais empregados, pelas perdas no transporte e armazenamento, pela má qualificação de mão de obra, pela má manipulação por parte da mão de obra, além da substituição de componentes pela reforma ou reconstrução.

Com a Conferência sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente das Nações Unidas (ECO 92), surgiram questionamentos quanto à possibilidade de o homem continuar explorando os recursos naturais, sem com isso prejudicar suas próximas gerações. Surge a partir daí, a percepção de que a visão de

desenvolvimento sustentável não apenas demanda a preservação dos recursos naturais de maneira a garantir iguais condições de desenvolvimento, mas também mais igualdade no acesso aos benefícios do desenvolvimento (22).

Dessa preocupação, do que fazer com os resíduos gerados pela construção civil, surge a Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) 307 de 5 de julho de 2002 (23), alterada pela Resolução CONAMA 348 de 16 de agosto de 2004 (24), que inclui o amianto como material perigoso. Segundo a Resolução CONAMA 307/02, seu artigo 2º define o que são resíduos da construção civil: "I - Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha".

Para esses materiais classificados como resíduos de construção civil, a resolução CONAMA, em seu artigo 3º, dá a seguinte classificação: "I. Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras; II. Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos,

papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros; III. Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso; IV. Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde".

Ainda segundo a Resolução CONAMA, o artigo 2º define o que é reutilização e reciclagem: "VI. Reutilização – é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo; VII. Reciclagem – é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação".

Segundo a classificação da Resolução CONAMA, os materiais possivelmente recicláveis correspondem a uma grande parcela dos materiais hoje utilizados em construção. Estimativas internacionais indicam a produção de 130 a 3000 kg/hab.ano. A média brasileira gira em torno de 510 kg/hab.ano (21). Segundo Pinto (25), diretor técnico da empresa I & T (Informações e Técnicas) o entulho típico, material pesado removido da obra, é constituído em sua grande parte (60%) pelas perdas de argamassa. O restante do material retirado no final das obras são restos de componentes de vedação (tijolos, blocos e materiais de revestimento). Embora ainda não existam estatísticas de todo o país, na média, o resíduo gerado pela construção civil que sai dos canteiros de obra brasileiros é composto basicamente por:

- 64% de argamassa;
- 30% de componentes de vedação (tijolos e blocos) e
- 6% de outros materiais (concreto, pedra, metálicos e plásticos).

Dos dados acima descritos a conclusão a que se pode chegar é de que mais de 90% dos resíduos podem ser triturados e reutilizados como agregado, na produção de componentes de construção e argamassa (26).

Segundo a NBR 10004 (27), que dá a classificação de resíduos sólidos, os resíduos de construção e demolição são classificados como materiais inertes, porém na reutilização desses materiais como novos componentes de elementos de construção civil é preciso analisar adequadamente quais dentre os materiais descartados serão reciclados. Segundo John e Agopyan (28), os resíduos de construção e demolição típicos provavelmente seriam classificados como não inertes especialmente devido ao seu pH e dureza da água absorvida, resultados obtidos se forem submetidos à análise, porém em alguns casos eles podem conter contaminações importantes. Estas contaminações podem tanto ser oriundas da fase de uso da construção a partir dos quais foi gerado, quanto do seu manuseio posterior. Estes contaminantes podem afetar tanto a qualidade técnica do produto contendo o reciclado quanto significar riscos ambientais.

Ainda segundo John e Agopyan (28) resíduos de construção e demolição (RCD) retirados de obras expostas à atmosfera marinha podem estar contaminados por sais que, dependendo da situação, podem levar à corrosão de metais, limitando o uso em concreto armado, por exemplo.

No caso de resíduos oriundos de construções industriais é preciso um cuidado especial quando de sua reutilização, ou mesmo na reutilização de telhas

de fibrocimento, onde uma parte da matéria-prima é o amianto. Cuidados no seu reaproveitamento devem ser tomados, uma vez que a presença do pó de amianto no ar é considerada cancerígena (28).

Os resíduos gerados pela construção civil, são geralmente depositados de forma descontrolada dentro da malha urbana, acarretando uma série de custos ambientais, tais como:

- Montes de resíduos de construção civil agregam outros tipos de resíduos (orgânicos, por exemplo) e se tornam abrigo de vetores transmissores de doenças (ratos, baratas, moscas, mosquitos) e de animais peçonhentos (cobras, escorpiões);
- Resíduos jogados em vias públicas e córregos afetam a drenagem e a estabilidade das encostas, provocando a degradação da paisagem urbana;
- Ocorrência de desperdício de recursos naturais não renováveis;
- Ocorrência de redução da vida útil dos locais adequados para aterramento dos resíduos não-renováveis (26).

Segundo John apud Ângulo (18) a reciclagem na construção civil pode gerar inúmeros benefícios como:

- Redução no consumo de recursos naturais não renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados;
- Redução do consumo de energia durante o processo de produção. Com destaque para a indústria do cimento, que usa resíduos de bom poder calorífico para a obtenção de sua

matéria-prima (co-incineração) ou utilizando a escória de alto-forno, resíduo com composição semelhante ao cimento;

- Redução da poluição; por exemplo, para indústria de cimento, que reduz a emissão de gás carbônico utilizando escória de alto forno em substituição ao cimento portland.

Segundo Pinto apud Ângulo (18), outro benefício que pode surgir devido à reciclagem de resíduos da construção civil é a redução de áreas necessárias para aterro, pela minimização de volume de resíduos pela reciclagem. É preciso destacar que há a necessidade da própria reciclagem dos resíduos de construção e demolição, que representam mais de 50% da massa dos resíduos sólidos urbanos.

Segundo Zordan (2) algumas prefeituras do Brasil, tentaram solucionar o problema de destinação do entulho, como a reciclagem dos entulhos em usinas montadas com essa finalidade. As primeiras que foram implantadas, como a usina Itatinga, na cidade de São Paulo, e a de Londrina, no Paraná, não tiveram o efeito esperado devido a erros de planejamento, o que as tornaram ociosas. Mas outros exemplos de sucesso, como o da cidade de Belo Horizonte, MG, que iniciou um programa de reciclagem de entulho, incluindo a instalação de 4 usinas de reciclagem. A primeira delas está operando desde novembro de 1995, e com eficiência. Ribeirão Preto e São José dos Campos, ambas no interior de São Paulo, também havia previsão de instalação de usinas de reciclagem, planejadas pelos mesmos profissionais da cidade mineira.

Deve haver uma preocupação por parte dos órgãos públicos, a dar uma melhor destinação aos resíduos gerados pela construção civil, mas também as empresas de engenharia devem se preocupar com essa questão. Segundo

John (22) o projeto de uma obra vai exigir a avaliação dos múltiplos aspectos ambientais envolvidos, durante todo o ciclo de vida. A seleção de materiais de acordo com a agenda ambiental local, economia de energia, uso racional da água, reciclagem de resíduos, tratamento de dejetos, preservação da paisagem etc. serão incorporados na fase de projeto.

John afirma ainda, que o modelo linear de produção deverá ser substituído por um modelo mais eficiente no aproveitamento dos recursos investidos, definido como de ciclo fechado. Neste modelo, a utilização de todos os recursos empregados é melhorada e a geração de resíduos é reduzida a um mínimo reciclável. Com esse modelo, os produtos devem ser projetados e construídos de forma a facilitar as operações de reabilitação ou reformas, desmontagem, e até reciclagem dos produtos.

Szekely e Trapaga (29) tentam definir o conceito de uma indústria ecológica e discutem quais os principais meios que podem ser considerados no ciclo dos materiais utilizados na indústria. Dessa forma, apresentam um ciclo a ser empregado em uma indústria ecologicamente ideal, quando do processamento de matéria prima. A figura 2 apresenta o modelo dado por esses autores.

Figura 2 – Indústria ecológica ideal (29)

Para a área de construção civil, John (22) apresenta uma adaptação do modelo de ciclo fechado (figura 3). Este ciclo fechado vai implicar necessariamente um maior volume de reciclagem na construção civil, especialmente de seus próprios resíduos.

Figura 3 – Ciclo de produção fechado (22)

2.4. Escória de alumínio como rejeito industrial

Para se classificar um resíduo industrial como perigoso, é preciso saber como é o seu processamento industrial juntamente com a matéria-prima utilizada (19).

Segundo Shinzato (30), os poluentes gerados durante o processo de fusão do alumínio são provenientes da queima de óleo combustível, da carga a ser fundida que contém compostos orgânicos voláteis presentes nas tintas, vernizes etc., da escória retirada dos fornos e do tratamento do metal líquido. Contribuem também os efluentes líquidos associados ao sistema de água de refrigeração dos moldes e o resíduo sólido representado pela escória.

Segundo o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) a escória de fundição de alumínio é classificada como resíduo não perigoso (classe 2) entretanto, devido às emissões muito intensas de amônia e outros gases como

metano e acetileno, pode passar para a categoria 1 (perigoso) (31). Esses gases são gerados principalmente pelas reações de nitretos, carbetos etc., com a umidade do ar:

O nitreto de alumínio (AlN) é formado pela reação do nitrogênio atmosférico com o alumínio durante o processo de combustão, a altas temperaturas (superiores a 1500° C) e é potencializado na incandescência da escória (32):

Os carbetos são gerados a partir do processo de aquecimento de óleos e graxas que reagem com o alumínio.

Muitos são os trabalhos que tratam dos problemas causados pela fundição direta da escória de alumínio e poucos são os que tratam daqueles causados pelo processamento desse material secundário pelas empresas terceiristas. Entre estes destaca-se o de Graczyk *et al.* (33) que encontrou, entre os principais elementos constituintes do produto de lixiviação da torta salina, Al, Mg, Na, Si, Ca e Fe e concentrações-traços de Cu, Zn, Pb e Mn (30).

Os problemas inerentes ao descarte dos resíduos gerados pelas empresas terceiristas de recuperação de metais ainda não foram solucionados uma vez que estes acabam sempre nas mãos dos pequenos empresários que são autuados pelos órgãos ambientais, que chegam a fechar suas firmas, devido ao não cumprimento das leis quanto ao descarte correto do rejeito. Cabe ressaltar que, por este motivo, as pequenas empresas não possuem local definido para a

sua instalação e sempre se deslocam até serem "redescobertas" pelos mesmos órgãos de fiscalização ambiental. Apesar da maioria das empresas de reciclagem funcionar na clandestinidade, as vantagens econômicas encontradas nesta atividade são muito grandes, uma vez que a escória utilizada é, em parte, doada e a água, retirada gratuitamente de córregos, lagoas etc., sem falar da mão-de-obra barata, encontrada principalmente nas periferias das grandes cidades (34).

2.5. O profissional e a geração de entulhos

Algumas empresas construtoras, como a Construtora Shpaisman e Construtora Engemax, utilizam moinho/argamassadeira dentro da própria obra para moer os resíduos e a utilizam depois como misturadora para argamassas (35).

A Racional Engenharia (36) criou uma central de reciclagem, na cidade do Rio de Janeiro, que inclui uma miniusina de reciclagem e uma fábrica de blocos e artefatos de concreto. O entulho passa por um processo de eliminação de aço, compostos de gesso e outros materiais que contenham produtos químicos capazes de afetar a qualidade do agregado. O restante é triturado por britadores e passa por peneiras vibratórias que separam o material de acordo com as diferentes granulometrias (areia grossa, pedriscos e brita zero). Depois dessa etapa, é feita a mistura com cimento e aditivos e a massa obtida entra na linha de produção. Os blocos, fabricados de acordo com as Normas Técnicas Brasileiras, estão sendo doados aos governos estadual e municipal do Rio de Janeiro para construção de casas populares.

A empresa Racional Engenharia (37) utiliza desde 1998 um programa de Gestão Ambiental, na qual fornece orientações aos seus fornecedores (com

treinamento). Analisa todas as atividades existentes na obra, com o intuito de provocar o menor impacto ambiental. A vantagem econômica é pequena, mas há uma melhora quanto ao aspecto ambiental.

2.6. Reciclagem e os investimentos

Atualmente existem diversos estudos onde a aplicação do resíduo gerado pela construção civil é possível.

A Prefeitura de São Paulo utiliza o material recebido no Aterro Itaquera e reciclado na recicladora pública de Itaquera, na recuperação de leitos carroçáveis de vias públicas e calçadas e também como materiais de cobertura e implantação nos acessos dos aterros sanitários (21).

No VI Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, realizado em outubro de 2003 foram apresentados diversos trabalhos de utilização de resíduos de diversas origens incorporados à argamassas e/ou concretos não estruturais. Materiais como, argamassas com areia de entulho reciclado, sub-base de pavimentos asfálticos, agregado na fabricação de blocos de concreto, concreto com agregado reciclado para fins não estruturais (38), apresentam desempenho satisfatório quando usados e dosados adequadamente.

A utilização de resíduos gerados pela construção civil e também a incorporação de outros resíduos, alguns classificados como perigosos (por exemplo, resíduos de couro) em material para a construção civil (concreto) (39), que, dentro desses materiais, ficam inertes, é uma possibilidade de aplicação. Mas cuidados devem ser tomados, principalmente quando da seleção do material a ser reciclado, uma vez que a constituição desses resíduos é muito heterogênea,

o que torna a separação desses materiais bastante complexos e cria uma série de limitações e particularidades para a sua reciclagem. Alguns de seus constituintes podem ser separados com certa facilidade, enquanto outros não permitem esta operação, podendo contaminar o entulho ou até mesmo torná-lo impróprio para a reciclagem em determinadas aplicações. Tudo vai depender das características do resíduo contaminante, do grau de contaminação e da aplicação que se deseja dar ao produto reciclado. Contaminação essa que pode ser pela presença de lixo doméstico, marmitex de operários da obra, móveis, eletroeletrônicos e outras sucatas misturadas aos resíduos de construção civil (40).

2.7. Os incentivos à reciclagem

Segundo Kraemer (17), a legislação francesa estabelece que a empresa deve, em primeiro lugar, evitar a geração de resíduos; se houver geração, deve-se primeiramente tentar o reaproveitamento do resíduo, recuperando a matéria-prima; no caso de tratamento fora da usina, deve-se antes buscar um tratamento que possibilite a valorização térmica; e, em último lugar, deve-se utilizar o aterro.

Na China, país de grande extensão territorial há o conceito de que o resíduo sólido gerado é de responsabilidade do cidadão (17).

A prefeitura de Belo Horizonte pretende implantar quatro usinas de reciclagem de entulho, atualmente duas estão em operação, com capacidade de 120 t/dia (Estoril) e 240 t/dia (Pampulha), contando com aprovação da população (41).

Em São Paulo, a prefeitura implantou, em 1991, uma usina de reciclagem com capacidade para 100 t/hora, produzindo material utilizado como

sub-base para pavimentação de vias secundárias (41).

Em 1993, a prefeitura de Santo André, iniciou um projeto para reciclagem diária de 30 m³ de resíduos e a produção de aproximadamente 4 mil blocos por dia, com material recuperado (2).

Em 1994 foi inaugurada a Central de Moagem de Entulhos na cidade de Londrina. Atualmente quase não existem pontos de despejo inadequados (41).

Na cidade de Ribeirão Preto, cerca de 30% do entulho gerado pela cidade são operados na Usina de Reciclagem de Entulhos da Construção Civil e o material produzido é utilizado na recuperação de estradas municipais sem pavimentação (41).

Em São José dos Campos, foi fundada em 1997, a Usina de Reciclagem de Entulhos, sendo desativada em 1998. Quando em operação, chegou a processar cerca de 30% do entulho recebido, utilizados em áreas rurais sem pavimentação (41).

A prefeitura de Guarulhos está implantando um sistema de coleta seletiva, áreas destinadas a transbordo e de despejo de lixo, locais chamados ECOPONTOS (local destinado a receber os resíduos e lá mesmo provocar a separação do que é reciclável ou não) (40).

No Brasil, essa preocupação com o desenvolvimento sustentável, começou a tomar corpo efetivamente por volta da década de 90, quando se começou a discussão do que fazer com o entulho gerado em obras de construção civil. Em Belo Horizonte, no final de 1995, surge a primeira usina de reciclagem de entulho. Usina essa que processava cerca de 100 t/dia de resíduos da construção (1996). Atualmente existem duas usinas de reciclagem na cidade de Belo Horizonte (40).

Pinto (42) estimou que em cidades brasileiras de médio e grande porte, a quantidade de resíduos de construção variava de 41% (Salvador – Ba) a 70% da quantidade total de resíduos sólidos urbanos. Dentro da área de construção civil, a geração de entulho é devida ao alto e polêmico índice de perdas. Embora nem toda perda se transforme efetivamente em resíduo, pois uma parte acaba ficando na própria obra, os índices médios de perdas fornecem uma noção clara do quanto se desperdiça em materiais de construção. Em média, cerca de 50% do material desperdiçado corresponde ao entulho gerado.

2.8. Pesquisas sobre reciclagem

Devido à necessidade de o homem procurar novas alternativas do que fazer com o resíduo sólido gerado pela população, vários pesquisadores têm estudado alternativas de incorporação de rejeitos em materiais construtivos.

Nuvolari (43) estudou a incorporação de lodo de esgoto em tijolos cerâmicos. Zordan (2), a utilização de entulho como agregado, na confecção do concreto. Labrincha et alli (44, 45) tem estudado a incorporação de escórias de fundição na fabricação de concretos especiais, mistura de granalha da indústria naval em pastas cerâmicas, e aproveitamento de lamas de tratamento de água para produzir argila expandida. Garlet (5) estudou o aproveitamento de resíduos de EVA da indústria coureira como agregado para concreto leve na construção civil. Santos (46) estudou a incorporação de resíduos sólidos de ETE (estação de tratamento de esgotos) em massa cerâmica. Holanda e Viana (47) estudam a reciclagem de borra oleosa através de incorporação em blocos cerâmicos de vedação. Resíduo sólido proveniente da indústria siderúrgica na formulação de uma massa argilosa para fabricação de cerâmica vermelha é estudado por

Oliveira e Holanda (48). Pó de aciaria misturado com argila formando “tijolos ecológicos” foi estudado por Domínguez e Ullmann (49). Tay et alli estudaram mistura de argila com lama como agregado leve para concreto (50).

Existem diversos trabalhos que envolvem resíduos industriais ou mesmo resíduos da construção civil incorporados à massa cerâmica e/ou ao concreto. Aqueles mencionados acima são alguns destes.

2.9. Conclusão

Kraemer (17), em seu trabalho afirma que a soma das ações de controle, envolvendo a geração, manipulação, transporte, tratamento e disposição final, pode se traduzir nos seguintes benefícios principais:

- Minimização dos riscos de acidentes pela manipulação de resíduos perigosos;
- Disposição de resíduos em sistemas apropriados;
- Promoção de controle eficiente do sistema de transporte de resíduos perigosos;
- Proteção à saúde da população em relação aos riscos potenciais oriundos da manipulação, tratamento e disposição final inadequada;
- Intensificação do reaproveitamento de resíduos industriais;
- Proteção dos recursos não renováveis, bem como o adiamento do esgotamento de matérias-primas;

- Diminuição da quantidade de resíduos e de seus elevados e crescentes custos na destinação final;
- Minimização dos impactos adversos, provocados pelos resíduos no meio ambiente, protegendo o solo, o ar e as coleções hídricas superficiais e subterrâneas de contaminação.

Pinto e Agopyan (51), chegaram às seguintes conclusões:

- “Mais de 90% dos resíduos da construção civil podem ser reutilizados na indústria da construção civil, para produção de argamassa ou componentes de construção.
- É imprescindível conhecer a composição química e as qualidades físicas do resíduo reciclado, para poder definir o uso a que será destinado.
- A utilização de rejeitos contribui para a melhoria do meio-ambiente e reduz os gastos públicos para gerenciá-los.
- O processo de reciclagem deve ser considerado numa escala abrangente, juntamente com políticas de ação local e não simplesmente provendo usinas de reciclagem.
- Os principais adversários à reciclagem de resíduos da construção são decorrentes da falta de políticas sistemáticas e da dificuldade de mudar os hábitos das pessoas envolvidas na construção civil.”

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Serão descritos neste capítulo, os materiais utilizados neste trabalho, a preparação dos corpos de prova e os métodos empregados na sua caracterização.

3.1. Materiais

3.1.1. Argila

A argila em estudo é oriunda da região de Várzea Paulista, da jazida Jarinu, sendo rica em silício, alumínio e ferro, sendo este material essencial para que ocorra a expansão pirolástica. A tabela 2 apresenta os dados fornecidos pela empresa Argexpan (12) de seu material e não há informação de qual técnica foi adotada para obtenção desse resultado.

Tabela 2 – Características da argila – dados fornecidos pelo fabricante – empresa Argexpan

ANÁLISE QUÍMICA TÍPICA	% em massa
Óxido de silício (SiO_2)	62,23
Óxido de alumínio (Al_2O_3)	23,55
Óxido de ferro (Fe_2O_3)	9,39
Óxido de potássio (K_2O)	2,73
Óxido de cálcio (CaO)	0,03
Óxido de magnésio (MgO)	0,85
Óxido de titânio (TiO_2)	0,97
Óxido de sódio (Na_2O)	0,23
Total	99,98
Perda ao fogo	8,25

3.1.2. Escória de Alumínio

A escória de alumínio é proveniente da indústria de reciclagem secundária de alumínio na região de Araçoiaba da Serra. Nenhum dado sobre a escória foi fornecido pelo fabricante.

3.2. Métodos

3.2.1. Argila e escória de alumínio

Inicialmente foram feitos alguns ensaios de caracterização dos materiais de partida, como a determinação de composição química e impurezas por espectrometria por fluorescência de raios X; determinação da distribuição granulométrica por espalhamento de um feixe de laser, difração de raios X, observação da morfologia das partículas por microscopia eletrônica de varredura, análise térmica diferencial e termogravimétrica da argila.

3.2.2. Argila com incorporação da escória de alumínio

3.2.2.1. Confeção dos Corpos de prova

Os corpos de prova com formato esférico foram confeccionados manualmente, com argila proveniente da jazida Jarinu e a escória de alumínio em proporções que variaram de 5%, 10%, 15% e 20%, em massa, na argila.

3.2.2.2. Ensaios de massa específica e expansão pirolástica

Os ensaios foram realizados com amostras, queimadas em forno tipo mufla (Quimis Q318 D21), ensaio de queima rápida (3 minutos), a temperaturas variando de 1000°C a 1170°C, sendo anotadas massas das amostras antes e após a queima e seus respectivos diâmetros e suas massas

específicas aparentes ($\gamma = M_s/V$). Onde γ é a massa específica aparente; M_s é a massa seca após a expansão e V o volume aparente da amostra, obtido através do diâmetro médio da amostra. As determinações de massa específica antes e após a queima foram feitas em balança (Marte LS-200). A expansão pirolástica foi determinada por medição do diâmetro dos corpos de prova, antes e após a queima (Paquímetro Mitutoyo)

O ensaio de queima rápida consiste aquecer o forno até a temperatura desejada, colocar o recipiente que irá receber a amostra e deixá-la por um período de 3 horas, de maneira que o recipiente fique a mesma temperatura do forno e após esse período queimar a amostra durante o período de 3 minutos, ocorrendo dessa forma a expansão da amostra.

3.2.2.3. Ensaio de Absorção de água

O ensaio de absorção de água consistiu na imersão do material já preparado e com leitura de dados em 1, 2, 3, 4, 8, 20, 22, 24 e 28 horas. O material ficou imerso em água nos intervalos acima citados e sua massa após a imersão foi medida após o enxugamento da amostra com um pano seco (52).

A amostra seca ficou em recipiente com água potável de forma que ficasse totalmente submersa. Após o tempo previsto para a imersão da amostra em água, jogou-se o líquido, enxugando-se a amostra com um pano seco e a seguir pesou-se novamente a amostra. A diferença entre as duas massas, corresponde à quantidade de água absorvida. Determinou-se a massa específica da amostra após a imersão.

3.2.2.4. Ensaios de Solubilização e Lixiviação

Os ensaios de lixiviação e solubilização foram realizados devido à presença de alguns metais pesados no material. Para observar se os materiais permanecem inertes quando incorporados à massa de argila, fez-se a necessidade de verificar quanto à toxicidade do produto quando do seu despejo em aterros. Os ensaios consistem em verificar se o material quando submetido aos ensaios de solubilização e/ou lixiviação, liberam algum tipo de material tóxico ao meio ambiente. Para que tais ensaios fossem realizados, utilizaram-se as normas NBR 10005/04 (53) e 10006/04 (54), procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos e procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, respectivamente.

Para obtenção do extrato lixiviado foram pesados 10 g de amostra de argila expandida com incorporação da escória de alumínio cominuída e passada pela peneira de 9,5 mm (3/8 mesh). Acrescentou-se solução de extração composta de ácido acético glacial e hidróxido de sódio e água deionizada até o volume de 40 mL. Mediu-se o pH (4,95). Após essa mistura, o frasco foi fechado e vedado e mantido sob agitação durante 18 horas, à temperatura de até 25°C, com uma rotação de (30±2) rpm no agitador rotatório. Após o período de agitação, o material foi filtrado e medido o pH (4,97) (53). O material filtrado é o extrato lixiviado que foi submetido ao ensaio ICP-AES – espectrometria de emissão atômica com plasma induzido, na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de São Paulo.

No ensaio de solubilização, as amostras de argila expandida com a incorporação de escória foram cominuídas e passadas pela peneira de 9,5 mm (3/8 mesh). Foram pesados 10 g de amostra e acrescentou-se água destilada

até o volume de 40 mL. Após essa mistura, agitou-se a amostra a baixa velocidade por 5 minutos. Após a agitação o frasco foi coberto com filme de PVC e deixado em repouso por 7 dias, a temperaturas de até 25°C. Após este período, o material foi filtrado e mediu-se o pH (9,07) (54). O material filtrado é o extrato solubilizado, que foi submetido ao ensaio ICP-AES – espectrometria de emissão atômica com plasma induzido, na Central Analítica do Instituto de Química da Universidade de São Paulo.

Para determinação da quantidade de metais pesados presente nos extratos solubilizados e lixiviados, utilizou-se a técnica ICP-AES, espectrometria de emissão atômica com plasma induzido.

3.2.2.5. Ensaio de resistência à compressão

Segundo Garlet (5) o concreto leve feito com agregado leve é obtido da mistura de cimento, agregado miúdo e agregado graúdo leve. E que sua massa unitária pode variar de 300 a 1350 kg/m³, dependendo de sua aplicação. O concreto com agregado leve de argila expandida tem uma resistência à compressão variando de 5,6 a 8,4 MPa.

Utilizou-se o agregado graúdo confeccionado neste trabalho para confecção de corpos de prova para verificação de sua resistência à compressão. Foram confeccionados 6 corpos de prova, sendo 3 corpos de prova utilizando argila expandida produzida comercialmente e 3 corpos de prova com a argila expandida com incorporação de 10% de escória de alumínio, rompidos aos 7 dias.

O cimento utilizado foi o de alta resistência inicial, areia média e o traço (relação dos materiais cimento : agregado miúdo : agregado graúdo, que

compõe o concreto, em volume) adotado foi de 1 : 2,73 : 2,38, com relação água/cimento de 0,47.

3.2.3. Espectrometria por fluorescência de raios X

Para o ensaio de espectrometria por fluorescência de raios X foi utilizado o equipamento EDX-900 da Shimadzu.

3.2.4. Distribuição granulométrica por espalhamento de um feixe de laser

No ensaio de distribuição granulométrica por espalhamento de um feixe de laser foi utilizado o equipamento granulômetro modelo 1064, Cilas. Para a análise granulométrica a amostra de argila foi dispersa em água destilada com adição de pirofosfato de sódio como defloculante.

3.2.5. Difração de raios X

As amostras de argila foram preparadas de três maneiras diferentes, a primeira amostra não sofreu qualquer tipo de tratamento, sendo considerada como amostra padrão. A segunda amostra foi preparada com etileno glicol, sendo denominada amostra glicolada e a terceira amostra foi aquecida a 500°C por um período de duas horas.

O tratamento é feito dessa forma, pois os picos de argilominerais estão presentes numa faixa muito estreita, o que dificulta a definição de alguns deles, e também para certificar-se da presença de certos argilominerais, faz-se a necessidade da preparação das amostras.

A preparação das amostras e os ensaios foram realizados no difratômetro (Siemens D 5000), com comprimento de onda 3Å e velocidade de

varredura 0,05°/s. O equipamento utilizado pertence ao laboratório do Instituto de Geociências e os ensaios realizados com a colaboração do Dr. Flávio Machado de Souza Carvalho.

3.2.6. Microscopia eletrônica de varredura

Este ensaio permite o exame direto de superfícies de materiais espessos desde pequenos aumentos; a microscopia eletrônica de varredura é a adequada para o exame da textura das argilas, solos e sedimentos, bem como de materiais cerâmicos, cimento-amianto e concreto (10).

O equipamento da Philips, modelo XL30 foi utilizado para a realização dos ensaios.

A preparação de amostras para observação em microscópio eletrônico de varredura consistiu em dispersar os materiais secos sobre fita dupla face.

3.2.7. Análise térmica diferencial e termogravimétrica

O método de análise térmica diferencial é a técnica pela qual a diferença de temperatura (ΔT) entre uma amostra a ser analisada e o material de referência (termicamente estável) é medida em função da temperatura da referência (forno), enquanto a amostra e o material de referência são submetidos a um aumento programado e controlado de temperatura. O ensaio detecta também transformações energéticas (endotérmicas ou exotérmicas), tais como transformações polimórficas, como a do quartzo-alfa em quartzo-beta, pois não envolvem variação na massa (55).

A análise termogravimétrica é uma técnica em que a mudança de

massa de uma substância é registrada como função da temperatura ou do tempo. O equipamento necessário é uma balança de precisão com um forno programado para aumentar a temperatura linearmente com o tempo, o que permite o registro das variações de massa em função da temperatura. (56)

O ensaio do material de partida foi realizado no equipamento Netzsch, modelo STA 409, com razão de aquecimento de 5°C por minuto até 1250°C, em ar sintético e taxa de resfriamento de 15°C por minuto.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

Serão inicialmente mostrados os resultados obtidos relacionados com a caracterização dos materiais de partida (itens 4.1 e 4.2). Em seguida serão mostrados os resultados relativos à incorporação da escória de alumínio na massa de argila (item 4.3).

4.1. Escória de alumínio

A Tabela 3 apresenta o resultado obtido por fluorescência de raios X (FRX) para a escória de alumínio. Os teores relativos estão em % atômica.

Tabela 3 – Resultado da análise por FRX da escória de alumínio.

Elemento	% atômica
Alumínio (Al)	90,6
Silício (Si)	2,9
Cálcio (Ca)	1,9
Ferro (Fe)	1,5
Potássio (K)	1,3
Fósforo (P)	0,5
Titânio (Ti)	0,4
Cobre (Cu)	0,2
Cromo (Cr)	0,2
Manganês (Mn)	0,2
Chumbo (Pb)	0,1
Zinco (Zn)	0,1
Zircônio (Zr)	0,1
Níquel (Ni)	0,1
Estrôncio (Sr)	< 0,01
Total	100,00

Observa-se na Tabela 3 que o teor de alumínio é superior a 90%, sendo que diversos elementos estão presentes em teores inferiores a 1%. Outros elementos em maiores concentrações são: silício, cálcio, ferro e potássio.

Na micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura da escória de alumínio (figura 4) pode ser visto que o resíduo tem tamanhos relativamente pequenos (submicrométricos), apresentando-se na forma aglomerada. Pode também ser visto que há alguns aglomerados de formatos irregulares.

Figura 4 – Micrografia obtida em MEV da amostra de escória de alumínio.

4.2. Argila

A Tabela 4 apresenta o resultado de FRX da argila em estudo.

Tabela 4 – Resultado da análise por FRX da argila.

Elemento	% atômica
Silício (Si)	48,1
Ferro (Fe)	17,6
Alumínio (Al)	15,2
Potássio (K)	14, 6
Cálcio (Ca)	2,5
Titânio (Ti)	1,5
Manganês (Mn)	0,3
Zircônio (Zr)	0,1
Zinco (Zn)	0,1
Ítrio (Y)	< 0,1
Estrôncio (Sr)	< 0,1
Total	100,00

O resultado da Tabela 4 mostra que a argila em estudo é rica em silício, alumínio e ferro.

O resultado da análise granulométrica da argila, feita por espalhamento de um feixe de laser, pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Análise Granulométrica da Argila

O gráfico apresenta os resultados através de uma curva cumulativa, entretanto ela não é uma curva sigmóide e sim uma do tipo polimodal, mostrando que, provavelmente não foi obtida uma boa dispersão do material em estudo, encontrando-se este na forma aglomerada. Pode-se observar, pelo ensaio, que o diâmetro mediano da argila obtido no ensaio foi de 2 μm .

A figura 6 mostra uma micrografia representativa da morfologia das partículas de argila.

Figura 6 – Micrografia obtida em MEV da amostra de argila

Observa-se nesta micrografia que as partículas de argila têm tamanhos relativamente pequenos (submicrométricos), apresentando-se na forma aglomerada. Pode também ser visto que os aglomerados têm tamanho maior que aqueles da escória de alumínio (figura 4).

O resultado da difração de raios X da argila é mostrado na figura 7.

Figura 7 Difratoograma de raios X da argila

As amostras foram preparadas de três maneiras distintas, a primeira amostra não sofreu qualquer tipo de tratamento, sendo considerada como padrão. A segunda amostra foi preparada com etileno glicol, sendo denominada amostra glicolada e a terceira amostra foi aquecida a 500°C por um período de duas horas.

No difratograma, há uma mistura de vários argilominerais (mica, illita em pequenos teores) sendo o material predominante a caulinita, podendo-se notar picos de quartzo (27°).

Foram realizados ensaios de análise termogravimétrica e de análise térmica diferencial da argila, que são mostrados nas figuras 8 e 9.

Figura 8 – Curva Termogravimétrica da argila

Figura 9 – Curva de Análise Térmica Diferencial da argila

No gráfico da figura 8, de análise termogravimétrica, observa-se perda de água do material até 150°C, de 150 °C a aproximadamente 650°C nota-se perda de massa em função da liberação de matéria orgânica e água de cristalização. Após esta temperatura não se percebe mudança significativa de massa. Na figura 9 de análise térmica diferencial da argila observa-se que a

150°C temos uma reação endotérmica devido à perda de água adsorvida, a 500°C temos uma reação exotérmica provavelmente devido a desidroxilação da caulinita e a 800°C temos uma reação exotérmica, devido provavelmente a transição cristalina da argila.

4.3. Argila com incorporação da escória de alumínio

É importante salientar que foram confeccionados 5 (cinco) corpos de prova para cada composição. Assim, os valores apresentados nas figuras 10 a 12, 17 e 18 representam a média de 5 determinações independentes.

Os dados obtidos quanto à incorporação da escória de alumínio são mostrados nas figuras 10 a 12.

Figura 10 – Expansão linear das amostras

Na figura 10, observa-se que as amostras obtiveram expansão linear após o aquecimento, tendo as amostras com 15% de incorporação a maior expansão linear.

Figura 11 – Variação de massa das amostras

As amostras tiveram uma variação de massa da ordem de - 0,30 g, apesar da expansão linear, conforme figura 10.

Figura 12 – Massas específicas obtidas

Observa-se na figura 12 que a massa específica aparente das amostras está entre 0,60 g/cm³ e 1,60 g/cm³.

Nas figuras 13 a 18, estão apresentadas as amostras, antes da queima e após a queima.

Figura 13 – Amostra com 10% de escória, antes da queima.

Figura 14 – Amostra 6 após a queima, com 10% de escória a 1170°C.

Figura 15 – Amostra antes da queima, com 10% de escória.

Figura 16 – Amostra após a queima, com 10% de escória a 1000°C.

Figura 17 – Amostra antes da queima, com 15% de escória.

Figura 18 – Amostra após a queima, com 15% de escória a 1170°C.

4.3.1. Ensaio de absorção de água

No ensaio de absorção de água, obteve-se o resultado mostrado na figura 19.

Figura 19 – Absorção de água da amostra

Do ensaio de absorção de água, obteve-se a média de 19%.

Na figura 20, é mostrada a massa específica média do material após a imersão.

Figura 20 – Massa específica das amostras após ensaio de absorção de água

A média da massa específica obtida após o ensaio de absorção de água foi de $1,35 \text{ g/cm}^3$.

Os dados obtidos no ensaio de absorção de água estão apresentados nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Absorção de água das amostras com 10% e 20% de escória, queimadas a 1100°C.

TEMPO (h)	MASSA (g)	Amostra com 10%	Amostra com 10%	Amostra com 10%	Amostra com 20%	Amostra com 20%	Amostra com 20%
1	Inicial	4,734	5,436	5,011	6,742	5,854	5,038
	Final	5,252	5,995	5,495	7,404	6,467	5,489
2	Inicial	5,252	5,995	5,495	7,404	6,467	5,489
	Final	5,287	6,027	5,535	7,451	6,508	5,528
3	Inicial	5,287	6,027	5,535	7,451	6,508	5,528
	Final	5,301	6,042	5,556	7,480	6,520	5,554
4	Inicial	5,301	6,042	5,556	7,480	6,520	5,554
	Final	5,312	6,052	5,558	7,482	6,546	5,569
8	Inicial	5,312	6,052	5,558	7,482	6,546	5,569
	Final	5,448	6,154	5,631	7,524	6,570	5,590
20	Inicial	5,448	6,154	5,631	7,524	6,570	5,590
	Final	5,451	6,164	5,633	7,622	6,641	5,628
22	Inicial	5,451	6,164	5,633	7,622	6,641	5,628
	Final	5,479	6,188	5,636	7,606	6,661	5,640
24	Inicial	5,479	6,188	5,636	7,606	6,661	5,640
	Final	5,479	6,188	5,644	7,621	6,678	5,640
28	Inicial	5,479	6,188	5,644	7,621	6,678	5,640
	Final	5,489	6,199	5,649	7,642	6,686	5,648
Absorção de água após 28h de imersão (%)		15,94	14,03	12,73	13,35	14,21	12,11
Massa específica aparente após 28h de imersão (g/cm ³)		1,27	1,41	1,27	1,51	1,34	1,25

Tabela 6 – Absorção de água das amostras com 5% e 15% de escória, queimadas a 1050°C.

TEMPO (h)	MASSA (g)	Amostra com 5%	Amostra com 5%	Amostra com 5%	Amostra com 15%	Amostra com 15%	Amostra com 15%
1	Inicial	5,451	4,719	Amostra Fraturou Antes da Imersão.	4,225	2,430	3,577
	Final	6,636	5,672		5,185	3,090	4,649
2	Inicial	6,636	5,672		5,185	3,090	4,649
	Final	6,639	5,684		5,024	2,916	4,297
3	Inicial	6,639	5,684		5,024	2,916	4,297
	Final	6,708	5,669		5,029	2,849	4,455
4	Inicial	6,708	5,669		5,029	2,849	4,455
	Final	6,684	5,723		5,136	2,849	4,136
8	Inicial	6,684	5,723		5,136	2,849	4,136
	Final	6,770	5,786		5,216	2,905	4,166
20	Inicial	6,770	5,786		5,216	2,905	4,166
	Final	6,764	5,766		5,190	3,139	4,316
22	Inicial	6,764	5,766		5,190	3,139	4,316
	Final	6,764	5,766		5,191	3,139	4,315
24	Inicial	6,764	5,766		5,191	3,139	4,315
	Final	6,788	5,773		5,070	2,903	4,071
28	Inicial	6,788	5,773		5,070	2,903	4,071
	Final	6,812	5,742		5,185	3,192	4,287
Absorção de água após 28h de imersão (%)		24,97	21,68		22,72	31,36	19,85
Massa específica aparente após 28h de imersão (g/cm3)		1,33	1,82		1,13	1,08	1,02

4.3.2. Ensaio de lixiviação e solubilização

O material foi submetido aos ensaios de lixiviação e solubilização para análise quando do seu descarte, uma vez que o material de construção civil, segundo a NBR 10004/2004 é considerado inerte. Após preparo dos extratos lixiviado e solubilizado os materiais foram submetidos ao ensaio de ICP-AES – espectrometria de emissão atômica com plasma induzido.

Do ensaio de ICP-AES do extrato lixiviado, a tabela 7 mostra os

resultados obtidos e os resultados aceitáveis, segundo a NBR 10004/2004.

Tabela 7 – Análise comparativa de metais presentes encontrados no extrato lixiviado e a NBR 10004/2004 (anexo F).

Parâmetro	Resultado obtido do extrato lixiviado por ICP-AES (mg/L)	Limite máximo no extrato obtido no ensaio de lixiviação, segundo a NBR 10004/2004 (mg/L)
Chumbo	< 0,05	1,0
Cromo total	<0,001	5,0

Na tabela 8, observam-se os valores encontrados no extrato solubilizado.

Tabela 8 – Análise comparativa de metais presentes encontrados no extrato solubilizado e a NBR 10004/2004 (anexo G).

Parâmetro	Resultado obtido do extrato solubilizado por ICP-AES (mg/L)	Padrões para o ensaio de solubilização, segundo a NBR 10004/2004 (mg/L)
Alumínio	0,043	0,2
Chumbo	<0,05*	0,01
Cromo total	<0,001	0,05
Ferro	<0,05	0,3
Manganês	<0,001	0,1
Zinco	<0,001	5,0
Cobre	<0,01	2,0

* limite de detecção do equipamento ICP-AES

4.3.3. Ensaio de resistência à compressão

Para verificação do comportamento dos agregados produzidos com a incorporação de escória de alumínio, foram feitos corpos de prova (5 x 10

cm) com concreto e adição de argila expandida comercial e argila expandida com incorporação da escória. Foi utilizado o cimento de alta resistência inicial, areia média e em substituição a pedra britada, foram utilizadas as argilas citadas acima. O traço obtido para uma resistência de 10 MPa, foi de 1: 2,73 : 2,38. Uma parte de cimento, 2,73 de areia (em volume) e 2,38 de agregado. Somente a argila expandida comercial foi saturada inicialmente.

O resultado obtido é apresentado na tabela 9.

Tabela 9 – Resistência à compressão

Corpo de prova	Resistência à compressão (MPa)
1	9,1
2	8,1
3	16
4	2,8
5	1,5
6	2,4

Os corpos de prova 1 a 3 correspondem aos corpos de prova contendo argila expandida comercial. Os corpos de prova 4 a 6 correspondem aos corpos de prova contendo a argila expandida com incorporação da escória de alumínio.

CAPÍTULO 5

DISCUSSÃO

Após os ensaios realizados, observou-se que no ensaio de fluorescência de raios X, a escória de alumínio estudada, possui teor de alumínio superior a 90%, e os demais elementos presentes, em teores inferiores a 1%, com exceção do ferro, silício, cálcio e potássio. Dentre esses elementos, o silício e o ferro são elementos que auxiliam na expansão pirolástica da argila expandida. A argila em estudo é rica em silício e ferro. Pode-se observar que as porcentagens obtidas da amostra analisada pelo ensaio de fluorescência de raios X (tabela 4) são diferentes do mostrado na tabela 2, dados fornecidos pelo fabricante de argila expandida. Isso se deve provavelmente a amostras retiradas de jazidas diferentes.

Segundo Riley apud Santos (10), a presença do ferro permite a produção de gás no inchamento pirolástico de argilas, no qual a equação abaixo expressa a reação:

O óxido férrico é produzido pela limonita ou hematita presente na argila natural ou pela decomposição, com ou sem oxidação, de compostos ferrosos ou férricos.

Damasceno (57) também afirma que a principal fonte de gases é a redução do óxido de ferro.

Como estes autores afirmam, o ferro presente dentro da argila é um elemento importante para a produção da argila expandida. Na argila

estudada, esse teor é de aproximadamente 18% e na escória de 1,5%. A presença do ferro permite que ocorra liberação de gases, devido à transformação da hematita ou limonita em magnetita com liberação de oxigênio. O silício presente na argila ajuda no processo termoplástico (57). A alumina presente na escória terá a função de aumentar a refratariedade do material.

Pelo ensaio de difração de raios X, a argila é composta predominantemente de caulinita e quartzo, existindo outros argilominerais presentes no material. A caulinita segundo estudos de Souza Santos (10), é um dos materiais possíveis de obter a expansão da argila.

Na microscopia eletrônica de varredura, observou-se que as partículas, tanto da argila quanto do resíduo têm tamanhos submicrométricos, encontrando-se na forma aglomerada, não influenciando no processo de incorporação do resíduo dentro da massa de argila. Na análise granulométrica da argila, foi obtido um diâmetro mediano para partículas/aglomerados de 2 μm . Segundo Damasceno (57), partículas aglomeradas com diâmetro dessa ordem de grandeza, facilitam o seu processamento.

Nos ensaios de análise térmica diferencial e termogravimétrica, a argila sofre transformações típicas de uma caulinita.

Dos ensaios de expansão linear pode-se verificar que todas as composições contendo a escória de alumínio apresentaram expansão superior àquelas das amostras sem escória, para as temperaturas de 1000, 1050 e 1100°C. Este resultado mostra que a adição da escória é efetiva para produzir expansão na massa de argila. À temperatura de 1170°C não ocorre a expansão em todas as amostras contendo escória, provavelmente pelo alto

teor de alumina no material, dificultando a liberação de gás do material.

Todas as amostras, com e sem incorporação de escória de alumínio, apresentaram uma perda de massa após aquecimento às temperaturas entre 1000 °C e 1170 °C. Essa perda de massa deve-se à eliminação de água física e quimicamente adsorvida, além da água estrutural e de constituição da argila.

A massa específica aparente de todas as amostras estudadas, queimadas entre 1000 °C e 1170 °C, foi de 0,8 a 1,7 g/cm³. Valores de massa específica até 1,2 g/cm³ estão dentro dos limites do material comercial. A média encontrada de 1,7 g/cm³ foi para as amostras queimadas à temperatura de 1170 °C, mostrando que esta temperatura é muito alta e outras reações devem estar acontecendo.

As figuras 13, 14, 15, 16 mostram os corpos de prova com 10% de escória, antes e após a queima a 1000 °C (figuras 15 e 16) e a 1170 °C (figuras 13 e 14). Essas imagens exemplificam a expansão ocorrida durante a queima. Imagens semelhantes a essas foram obtidas com amostras com 5%. As figuras 17 e 18 mostram os corpos de prova com 15% de escória, antes e após a queima a 1170 °C, podendo-se observar na figura 18 a sua expansão e fragmentação. Esse resultado mostra que o máximo de incorporação de rejeito é de aproximadamente 10%

Do ensaio de absorção de água, observou-se que o material imerso em água por 28 horas obteve médias distintas, conforme a porcentagem de incorporação de escória. Para as amostras de 10% e 20% de incorporação de escória, queimadas a 1100°C, a absorção de água foi em média de 14%, já para as amostras de 5% e 15% de incorporação de escória, a média de absorção de água foi de 24% para a temperatura de queima de 1050°C. A

variação deveu-se provavelmente a temperatura de queima diferente e as amostras que continham 15% apresentaram-se muito expandidas e com vários poros, o que pode ter aumentado a sua absorção de água. Outro fator observado, foi que as amostras de 5% e 15% de incorporação de escória, soltavam fragmentos após o período de imersão. Os valores encontrados estão acima do observado em outros trabalhos que analisaram a argila expandida comercial (52). Alguns trabalhos citam a média de 11% (52). Essas diferenças podem estar relacionadas com o método de conformação (manual no presente trabalho) e a queima do material ser em forno tipo mufla e não em forno rotatório, como no caso da referência (52). A massa específica aparente obtida após o ensaio de absorção de água (massa específica saturada), apresentou relativamente pouca variação (figura 20), com valor médio igual a 1,35 g/cm³. Este valor indica que se o material for usado como agregado graúdo para concreto, ele deve ser saturado antecipadamente para que não ocorram alterações no traço do concreto, de forma a modificar a sua resistência final.

Dos ensaios de incorporação da escória na massa de argila, observou-se que é possível a sua incorporação, sem danos ao material final, até aproximadamente 10%, sendo que as amostras com 5% de incorporação apresentam melhores resultados.

Analisando os resultados obtidos com incorporação da escória, os materiais com 15% de escória, queimados a 1170°C, 1100°C e 1050°C obtiveram uma boa expansão, porém o material apresentou-se com muitos poros, chegando a se fragmentar. As amostras que obtiveram uma boa expansão linear e massa específica compatível com a argila expandida comercial foram as amostras com 5% de incorporação de escória.

Do resultado obtido do extrato lixiviado por ICP-AES, o material analisado pode ser considerado inerte. Quanto à análise do extrato solubilizado, o valor mostrado na tabela 8 é superior ao admitido pela NBR 10004, porém aquele valor refere-se ao limite de detecção da técnica utilizada, e não o valor encontrado na amostra. Para determinação exata da quantidade de chumbo presente na amostra é necessária a realização de outro tipo de ensaio, o ICP-MS, espectrometria de emissão atômica.

Do ensaio de resistência à compressão observou-se que os resultados obtidos dos corpos de prova 4, 5 e 6 que utilizaram o agregado produzido neste trabalho tiveram resultados inferiores aos obtidos dos corpos de prova que utilizaram a argila expandida comercial, isso se deve a dois fatores. Primeiro, os agregados produzidos não foram saturados inicialmente, o que influencia no resultado final obtido, porque pode haver alteração na relação água/cimento, e segundo porque os agregados produzidos neste trabalho tinham diâmetros relativamente grandes para o tamanho dos corpos de prova utilizados 5 cm x 10 cm.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A incorporação da escória de alumínio na massa de argila produz expansão pirolástica.

Incorporações em até 10% de escória de alumínio atendem aos padrões existentes (exceto para temperatura de 1170 °C).

Após a incorporação da escória de alumínio na massa de argila, exceto o chumbo, o material pode ser considerado inerte, segundo o estabelecido na NBR 10004/2004.

Os resultados apresentados indicam a possibilidade de reutilização de um material que até o momento não tem utilidade.

Quanto ao resultado obtido de resistência à compressão, a argila expandida produzida apresentou valores abaixo do esperado, devido principalmente ao tamanho dos agregados e das dimensões dos corpos de prova.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) DOMINGOS, Sabrina. Alternativas para a construção civil. **Quantum**, Santa Catarina, n. 1, N 2, p. 1-2, agosto de 2003.
- (2) ZORDAN, Sérgio Eduardo. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. Campinas, 1997. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, UNICAMP, Campinas, 1997.
- (3) **Sociedade x Meio Ambiente**. Disponível em <http://www.compam.com.br>. Acesso em 3 fevereiro de 2006.
- (4) BRASIL. Ministério de Meio Ambiente. **Agenda 21**. Disponível em <http://www.ma.gov.br>. Acesso em 20 de março de 2006.
- (5) GARLET, Givanildo. **Aproveitamento de resíduos de E.V.A. (Ethylene Vinyl Acetate) como agregado para concreto leve na construção civil**. Rio Grande do Sul, 1998, 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.
- (6) MAIA, M.A.C. *et. alli*. Sistemas construtivos com uso de resíduos: Uma alternativa para reduzir o custo da habitação popular. *In: Anais do Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*. Rio de Janeiro, novembro 1995, p. 503-509.
- (7) **Conhecendo o material**. Disponível em: <http://www.cempre.org.br>. Acesso em 4 de fevereiro de 2005.
- (8) ARAÚJO, Edval Gonçalves. **Desenvolvimento de Pós de Alumínio para a Produção de Concreto Celular – Projeto FAPESP 00/00219-2**. São Paulo, 2001, 97p. Relatório de pós doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2001.
- (9) COSTA, Carlos Eduardo. Incorporação de rejeitos na Indústria Cerâmica. **Qualidade na Construção**, São Paulo, n. 12, ano II, p. 44-46, 1998.

(10) SOUZA SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1992, 3v. 1089p.

(11) ARGILA EXPANDIDA. São Paulo: Argexpan, sd. 4p. Catálogo comercial/técnico.

(12) Tenório, J.A.S. **Aspectos fundamentais e Tecnológicos do Processo de Reciclagem de Latas de Alumínio**. São Paulo, 1996. 116p. Tese (Livre docência em Engenharia Metalúrgica) – Escola Politécnica, USP, São Paulo, 1996.

(13) _____. Análise das tendências no setor de reciclagem de alumínio. **Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.57, 130p. p. 113-117. março 2001.

(14) **Medalhas de alumínio**. Disponível em <http://www.ipt.br/institucional>. Acesso em 20 de setembro de 2006.

(15) PBQP-H: O impacto e o êxito do programa na construção imobiliária. **Tem Construção**, São Paulo, ano 12 n° 124, 26p. p. 14-15. novembro/dezembro 2005.

(16) BRASIL. Ministério das Cidades. **PBQP-H**. Disponível em <http://www.cidades.gov.br/pbqp-h>. Acesso em 31 de janeiro de 2006.

(17) KRAEMER, Elisabeth. **A questão ambiental e os resíduos industriais**. Disponível em http://www.A_questao_ambiental_e_os_residuos_industriais-Monografias_com.htm. Acesso em 15 de janeiro de 2006.

(18) ÂNGULO, Sérgio C.; ZORDAN, S.E.; JOHN, V.M. **Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil**. Disponível em <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/artigo%20IV.CT206_2001.pdf>. Acesso em 10 de outubro de 2003.

(19) ABETRE. Disponível em <http://www.abetre.org.br>. Acesso em 20 de março de 2006.

(20) JOHN, V.M.; ÂNGULO, S. C. AGOPYAN, V. Sobre a necessidade de metodologia de pesquisa e desenvolvimento para reciclagem. **Habitar e Infohab**, maio 2004. Disponível em <http://www.reciclagem.pcc.usp.br>. Acesso em 30 de outubro de 2004.

(21) Prefeitura do Município de São Paulo. *In*: Seminário Resíduos da Construção Civil – Nova Política e o Incentivo a Novos Negócios, 2003, São Paulo. **CD-ROM**. São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo, junho 2003

(22) JOHN, Vanderley M. Construção e Desenvolvimento Sustentável. **Qualidade na Construção**, São Paulo, n. 23, ano III, p.34-44, 2000

(23) BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA. **Resolução nº 307**, de 05 de julho de 2002. Disponível em <http://www.ma.gov.br>. Acesso em 17 de junho 2004.

(24) _____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA. **Resolução nº 348**, de 16 de agosto de 2004. Disponível em <http://www.ma.gov.br>. Acesso em 13 de fevereiro de 2006.

(25) PINTO, Tarcísio P. Desperdício em xequê. **Revestimentos**. São Paulo, 1989/1990.

(26) CAVALCANTI, Daniela K. C. **Políticas para a reciclagem de resíduos da construção civil**. Disponível em [http://www.geocities.com/dcorcuera/Outros/Políticas para a reciclagem de resíduos da construcao civil](http://www.geocities.com/dcorcuera/Outros/Políticas_para_a_reciclagem_de_residuos_da_construcao_civil). Acesso em 13 de novembro de 2003.

(27) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**. Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 71p.

(28) JOHN, V.M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de Resíduos da Construção**. Disponível em <http://www.reciclagem.usp.br/entulho/artigo>. Acesso em 14 de dezembro de 2003.

(29) SZEKELY, J.; TRAPAGA, G. Industrial ecology – The need to rethink the materials cycle: Some problems, solutions, and opportunities in the materials field. **Journal of Materials Research**. V. 10, n° 9. p. 2178-2196. september 1995.

(30) SHINZATO, M. C. **Comportamento de íons metálicos associados a rejeitos de indústria de reaproveitamento de alumínio e ligas metálicas em solos/sedimentos e águas**. São Paulo, 1999. 113p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, 1999.

(31) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (ABAL). **Reciclagem ABAL**, 2004. Disponível em <http://www.abal.org.br>. Acesso em 22 de novembro de 2004.

(32) FILETTI, A. Reciclagem de latas no Brasil: panoramas e perspectiva. In: Seminário Internacional de Reciclagem de Alumínio, 2. 1996. **Anais**, 1996, São Paulo. ABAL, p.87-95

(33) GRACZYK, D. G.; ESSELING, A.M.; HUFF, E.A.; SMITH, F.P.; SNYDER, C.T. Analytical chemistry of aluminum salt cake. In: Huglen, R. (ed.) **Light Metals**, 1997. **The Mineral, Metals and Materials Society**, p. 1135-40.

(34) ISHIKAWA, P. H. **Argamassas leves e elementos de alvenaria leve produzidos com adição de pó de alumínio reciclado**. Projeto de pesquisa. Fatec São Paulo. 2004, São Paulo. 96p.

(35) CORBIOLI, Nanci. Do caos à solução. **Construção São Paulo**, São Paulo, Ed. Pini, n° 2505. p. 6-9. fevereiro 1996.

(36) Racional Engenharia Ltda. **Reciclar é construir um mundo melhor**. São Paulo: IBRACON, outubro 2003. Palestra ministrada aos participantes do VI Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil.

(37) **RECICLAR É CONSTRUIR UM MUNDO MELHOR**. Racional Engenharia

Ltda. São Paulo: Racional Engenharia, sd. 4p. Catálogo comercial/técnico.

(38) ALTHEMAN, Dener; PAULON, V.A.; ZORDAN, S.E. **A durabilidade de concretos com agregados de entulho reciclado**. Disponível em http://www.ceset.unicamp.br/workshop/resumos/r8Artigo_lbracon.doc. Acesso em 11 de janeiro de 2005.

(39) BAFFA, I.; PULICANO, V.; FORNARI, T. Concretos com adição de resíduos de couro. *In*: VI Seminário de Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. São Paulo, outubro 2003. **CD-ROM**. São Paulo, 2003.

(40) PINTO, T. **Reciclagem de resíduos sólidos**. São Paulo: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo 27 mai 2003. Palestra ministrada aos alunos e público em geral.

(41) **Entulho – O aproveitamento e a reciclagem de resíduos da construção**. Disponível em <http://www.econocenter.com.br/reciclagem/entulho.htm>. Acesso em 14 de novembro de 2003.

(42) PINTO, T. P. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana**. São Paulo, 1999. 189p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1999.

(43) NUVOLARI, Ariovaldo. **Inertização de lodo de esgoto em tijolos cerâmicos maciços: Aspectos tecnológicos e ambientais**. São Paulo, 2002. 238p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2002.

(44) LABRINCHA *et alli*. **Universidade de Aveiro estuda reciclagem de resíduos industriais**. Disponível em <http://noticias.clix.pt/ciencia/>. Acesso em 12 de abril de 2004.

(45) _____. Recycling of Al-rich industrial sludge in refractory ceramic pressed

bodies. **Ceramics International**. V. 28, 2002. p. 319-326.

(46) SANTOS, Ailton D. **Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto da Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo, 2003. 282p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2003.

(47) HOLANDA, F.S.R.; VIANA, M.R.F.V. Reciclagem de Borra Oleosa através de Incorporação em Blocos Cerâmicos de Vedação. **Cerâmica Industrial**. V. 10, n.3. maio/junho 2005.

(48) OLIVEIRA, G.E.; HOLANDA, J.N.F. Reaproveitamento de resíduo sólido proveniente do setor siderúrgico em cerâmica vermelha. **Cerâmica**. V. 50, n. 314. p. 75-80, abril/maio/junho 2004.

(49) DOMÍNGUEZ, EDUARDO A.; ULLMANN, ROSA. "Ecological bricks" made with clays and steel dust pollutants. **Applied Clay Science**. 11 (1996). p. 237-249.

(50) TAY, Joo-Hwa; YIP, Woon-Kwong, SHOW, Kuan-Yeow. Clay-blended sludge lightweight aggregate concrete material. **Journal of Environmental Engineering**. American Society of Civil Engineers. Vol. 117 n. 6, p. 834-844, nov/dec 1991.

(51) PINTO, T.P.; AGOPYAN, Vahan. Construction Wastes as Raw Materials for Low-Cost Construction Products. *In*: First International Conference of CIB, Tg 16, November 1994, Tampa. **Anais**. Michigan, 1994.

(52) PINHEIRO, Alcina K. Agregados Leves Estruturais de Argila Expandida. *In*: Colóquio sobre "Agregados para Concreto". São Paulo, 1979. 55p.

(53) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 16p.

(54) _____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004. 3p.

(55) MATOS, Jivaldo R. **Introdução à Análise Térmica**. São Paulo: Instituto de Química – USP, 2004. Notas de aula.

(56) BASSET, J.; DENNEY, R.C.; JEFFERY, G.H.; MENDHAN, J. **Vogel Análise Inorgânica Quantitativa**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara. 4ª edição. 1981, 690p.

(57) DAMASCENO, Eduardo C. **Pesquisa de algumas matérias-primas para agregados leves**. São Paulo, 1973. 126p. Tese (Livre Docência em Engenharia de Minas). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1973.