



IBRACON

II SEMINÁRIO
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A
RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL



COMITÊ TÉCNICO
CT 206
MEIO AMBIENTE

1999, São Paulo, Anais.

CO-PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS EM FORNOS DE CIMENTO: TENDÊNCIAS

KIHARA, Yushiro (1)

(1) Geólogo, Gerente de Tecnologia da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, Av. Torres de Oliveira, 76 – Jaguaré – São Paulo – CEP-05347-902, E-mail: yushiro.kihara@abcp.org.br e Professor Doutor do Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental do IG-USP, E-mail: yushiro@usp.br

Palavras chaves: co-processamento, resíduos industriais, clínquer portland, forno de cimento

RESUMO

O co-processamento em fornos de clínquer de cimento constitui na operação combinada ao processo de fabricação, de incinerar resíduos perigosos, utilizando-os como combustíveis alternativos ou substitutos de matérias primas, sem prejuízo da qualidade do cimento.

No Brasil, o processo de normalização do co-processamento e o aumento na geração de resíduos industriais constituem os principais fatores impulsores do co-processamento, projetando-se um consumo anual de 400.000 t. de resíduos co-processados, nos próximos anos.

A co-incineração de resíduos no processo de fabricação de cimento responde positivamente em prol do desenvolvimento sustentável, pela sua atuação como fator redutor de geração de poluição e como instrumento de gestão ambiental de resíduos perigosos.

1. INTRODUÇÃO

O cimento é um material essencial para o desenvolvimento da construção civil e, além de sua importância econômica, tem contribuído na solução de vários problemas ambientais mediante o aproveitamento, em seu processo de produção, de inúmeros resíduos poluidores como matéria-prima, combustível ou adições ativas (fosfogesso, escórias siderúrgicas e cinzas de termelétricas)^(1 e 2). O uso de cimento no encapsulamento de rejeitos industriais nucleares, e na construção de sistemas de saneamento de efluentes sanitários e industriais também merece destaque.

A utilização de fornos de cimento para a eliminação de resíduos, pelo co-processamento, representa um novo papel que a Indústria Cimenteira pode desempenhar com eficiência, contribuindo com a sociedade na preservação do meio ambiente. A experiência de outros países tem demonstrado que o co-processamento pode representar em muitos casos uma solução de gerenciamento ambiental mais eficiente e econômica, sem prejuízo da qualidade do cimento.

2. CINÉTICA DE FORMAÇÃO DO CLÍNQUER PORTLAND

O clínquer de cimento portland é um material granular, sinterizado e pelotizado, produto da reação térmica (até 1450°C) de uma mistura de calcário e argila e eventualmente de componentes corretivos e mineralizadores, de modo a garantir o quimismo dentro dos limites específicos. As reações são de estado sólido, de natureza topoquímica, com produtos de reação constituídos principalmente de silicatos cálcicos e aluminatos e ferroaluminatos cálcicos subordinados.

O processo de fabricação do clínquer portland em fornos rotativos, esquematicamente representado na Figura 1, constitui-se das seguintes etapas⁽³⁾:

- extração e preparação das matérias-primas;
- dosagem e homogeneização da farinha crua e
- clinquerização e resfriamento do clínquer.

A elevação gradual da temperatura no processo de queima (100 a 1450°C) promove uma série de reações entre os componentes da farinha (Figura 2), o que leva, no final, à uma mineralogia característica do clínquer portland. Paralelamente às reações de cristalização e recristalização das fases do clínquer, ocorre um aumento no volume de gases resultante das reações de desidroxilação, volatilização e decomposição dos constituintes da farinha.

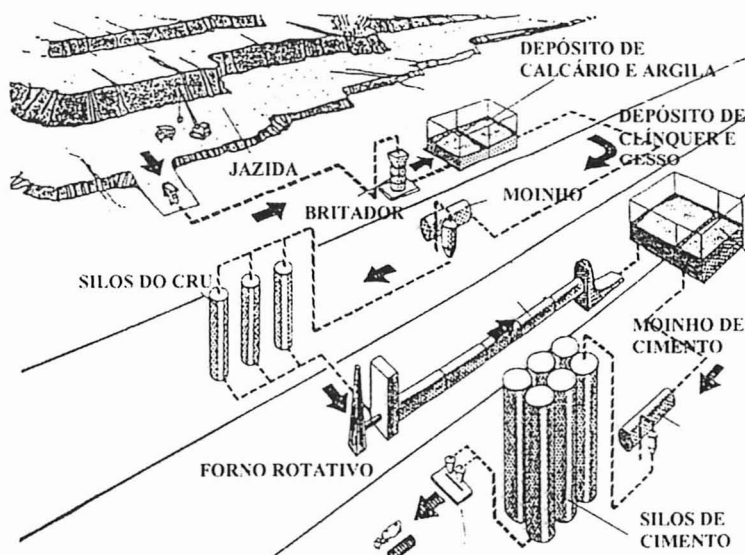


Figura 1 – Esquema simplificado da fabricação do cimento portland

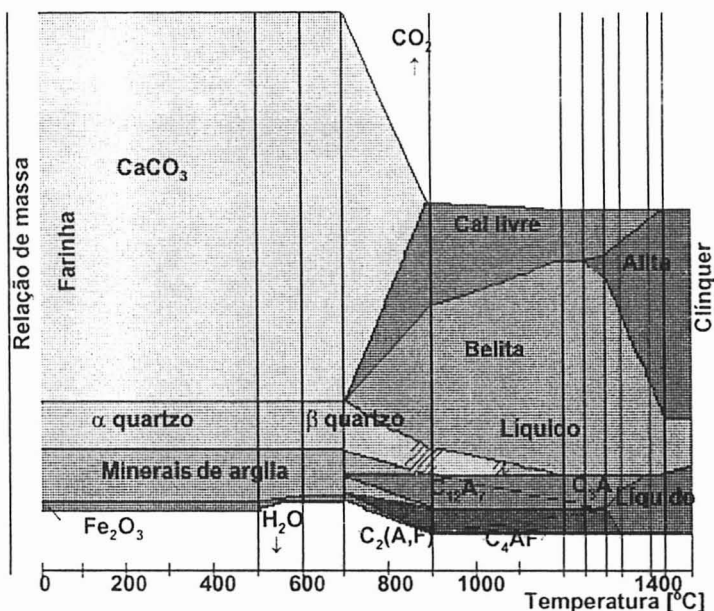


Figura 2 – Seqüência de reações que ocorrem durante a fabricação do clínquer portland (Cf. Wolter ⁽⁴⁾, 1985)

Nos clínqueres nacionais, o conteúdo de silicatos cálcicos (alita e belita) está geralmente na ordem de 65 a 85%, aluminatos e ferroaluminatos cálcicos na ordem de 10 a 20%, periclásio de 0,5 a 7% e cal livre de 0 a 2,5%. Excepcionalmente, a ocorrência de sulfatos alcalinos, sulfetos e fases reduzidas pode ser registrada em teores menores que 1%. Elementos menores como álcalis, fósforo, manganês, titânio, flúor, crômio, níquel e outros podem estar presentes nas fases do clínquer, incorporados na estrutura cristalina, substituindo íons em soluções sólidas.

3 CO-PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS EM FORNOS DE CIMENTO

3.1 Histórico do Co-Processamento

O termo co-processamento significa, em uma operação combinada, queimar e destruir resíduos poluentes simultaneamente ao processo de fabricação do clínquer. Esta operação só tem êxito quando se consegue destruir resíduos em um ambiente seguro, com redução dos custos de fabricação e garantia da qualidade do cimento.

A atividade de co-processamento na indústria de cimento constitui uma das fórmulas mais eficientes e econômicas de destruir e reciclar resíduos em grande volume. Esta atividade tem-se intensificado nos países desenvolvidos pelas vantagens que propicia às cimenteiras e pelos benefícios que oferece à proteção do meio ambiente.

As primeiras experiências foram realizadas com sucesso na década de 70, em fornos de via úmida, no Canadá, na cimento Saint Lawrence, com o objetivo de estudar a eficiência de destruição de resíduos clorados (1974 a 1976)⁽⁵⁾.

Na França, os primeiros ensaios foram realizados na Ciment Français (Dèsvres), em 1978. No mesmo ano registram-se estudos na Suécia, na fábrica Stora-Vika, também com resíduos clorados. Posteriormente, em 1979, nos Estados Unidos, o grupo Lafarge iniciou atividades de co-processamento na fábrica de Paulding, de onde se originou a Systech Environmental Corporation⁽⁵⁾.

No Brasil⁽¹⁾, as atividades de co-processamento de resíduos industriais propriamente dito, iniciaram-se na década de 90, nos estados de Minas Gerais, estendendo-se posteriormente para São Paulo, Rio de Janeiro, Paraná, Rio Grande do Sul, compreendendo 7 fábricas. Entretanto, a experiência de uso de combustíveis alternativos pela indústria de cimento é antiga e pioneira, registrando-se na década de 1980 o uso de casca de palha de arroz (Goiás e Rio Grande do Sul), moinha de carvão vegetal da indústria siderúrgica (Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro), carvão com alto teor de cinzas (Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e São Paulo), resíduos petroquímicos, casca de coco de babaçu, bagaço de cana e pneus.

Atualmente o espectro de resíduos coprocessados na indústria de cimento é muito variado, somando-se à lista de combustíveis alternativos⁽⁶⁾ utilizados desde a década de 80, os solventes químicos, óleos usados, resíduos de destilação petroquímica, pó de grafite, borras de pintura, plásticos e lodos de tratamento. São utilizados como fontes complementares de energia e matéria-prima e estima-se que, desde 1989, tenham sido co-processados em fornos de cimento mais de 300.000 t de resíduos, muito aquém dos países desenvolvidos.

O co-processamento de resíduos só tomou forte impulso a partir de 1996, com os trabalhos de normalização da atividade de queima, promovidos pelos órgãos ambientais de São Paulo (CETESB) e Minas Gerais (FEAM). Estes trabalhos contaram com a colaboração da indústria de cimento e culminaram com a aprovação das normas estaduais (1998) de São Paulo e Minas Gerais e a elaboração da norma federal CONAMA (1999).

3.2 Piroprocessamento de Resíduos em Fornos de Cimento

A geração de algumas dezenas de milhões de toneladas diárias de lixo urbano e de resíduos produzidos pela humanidade, representa uma séria ameaça à preservação do Meio Ambiente. No estado de São Paulo estima-se que são gerados 535.000 t/ano de resíduos perigosos da classe I e aproximadamente 20 milhões/ano de resíduos da classe II. A indústria siderúrgica nacional produz para cada tonelada de aço 480 kg de resíduos, dos quais 20% são aterrados ou estocados, correspondendo a 2,4 milhões t/ano. Este quadro visualiza um futuro preocupante e constitui um dos problemas mais sérios a serem equacionados e solucionados neste final do século nos grandes centros industriais. A *Tabela 1*, apresenta a disponibilidade de resíduos potencialmente co-processáveis, gerados por diferentes setores da indústria brasileira.

Neste contexto, a indústria de cimento tem contribuído de maneira especial para a solução deste problema, consumindo grandes volumes de resíduos industriais e vegetais como insumos ou combustíveis alternativos para a fabricação de clínquer portland e produção de cimentos especiais (pozolânicos e de alto-forno)^(2 e 7).

No período de 1952 – 1998 foram consumidos 72 milhões de toneladas de escória siderúrgica granulada e 10,1 milhões de cinzas volantes (fly ash) para a produção de cimentos com adições, permitindo nestes 46 anos a preservação e conservação de mais de 100 milhões de toneladas de calcários e de 25 milhões de toneladas de argilas. Atualmente, são consumidas anualmente 13 milhões de toneladas de escórias granuladas e 1,1 milhões de toneladas de cinzas de termelétricas que correspondem ao equivalente de 17,6 milhões de calcários e 3,5 milhões de argilas que serão preservados.

Tabela 1 – Resíduos co-processáveis de diferentes setores industriais

SETOR	RESÍDUOS
Siderurgia	Borra de alimentação, emulsão e óleos residuais, graxas, escórias
Tratamento de superfície	Lodos, borra de tintas, vernizes
Alumínio	Borra de alumínio. borra de oxalato de sódio, borra de Skimming
Borracha	Pneus, perfis e rebarbas
Petroquímica	Solvente, borra neutra, borra de petróleo, borra ácida, catalizadores
Indústria Automobilística	Borra de tintas, borra de solventes, borra de fosfato, plásticos, mantas
Embalagens	Pet, plásticos, exceto PVC
Construção Civil	Entulhos de construção

A indústria americana co-processa aproximadamente 1,2 milhões de t/ano de resíduo como combustível alternativo, representando 19% do consumo total. Na França, a indústria co-processa 400.000 t/ano e na Alemanha 464.000 t/ano, representando, respectivamente, 42 e 12% do consumo de energia térmica. No Japão, a indústria desenvolveu um programa de cooperação ambiental com o governo, resultando no aproveitamento de 27 milhões de toneladas de resíduos como insumos para a fabricação de cimento e como combustíveis alternativos. A Tabela 2, a seguir, apresenta o aproveitamento de rejeitos e sub-produtos pela indústria japonesa, em 1996⁽⁸⁾.

Tabela 2 - Aproveitamento de Rejeitos Industriais e Sub-produtos pela Indústria Cimenteira Japonesa (1986)

Tipo de Rejeito	Quantidade (t)
Oleo	263.000
Pneu	259.000
Escória Siderúrgica (*)	16.568.000
Lama de Carvão	1.772.000
Cinza de Carvão	3.402.000
Gesso e sub-produto	2.522.000
Outros	2.199.000
T O T A L	26.986.000

(*) parte como substituto de matéria-prima

O aproveitamento de resíduos industriais durante o processo de fabricação de cimento pode ser realizado de diferentes maneiras. A *Figura 1* a seguir apresenta um fluxograma de decisão de ponto de alimentação de resíduo na Indústria de Cimento.

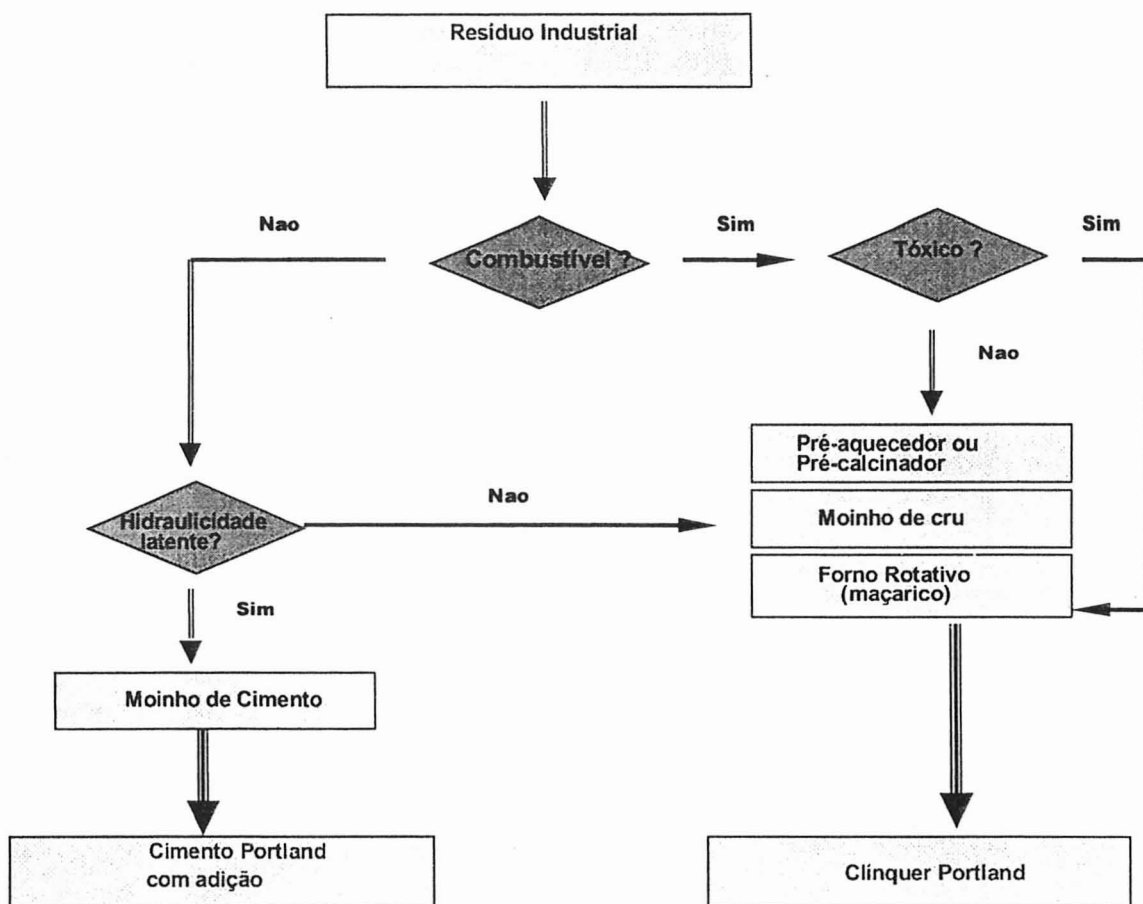


FIGURA 1 - Fluxograma de Decisão de Ponto de Alimentação de Resíduo

O resíduo industrial quando tem poder calorífico pode ser utilizado para diminuir o consumo de energia do combustível convencional. Pode ser calcinado pelo maçarico principal do forno, ou pelo maçarico secundário quando o forno está dotado de um sistema de pré-calcinação ou pela entrada do forno (faixa de fumaça).

No caso de resíduos tóxicos recomenda-se que a calcinação seja sempre pelo maçarico para garantir uma alta eficiência de destruição e remoção (DRE). No caso de dioxina, furanos e seus precursores reconhecidos, recomenda-se um DRE de 99,9999%.

Os resíduos industriais sem poder calorífico e toxidade podem ser utilizados como matéria-prima para a fabricação do clínquer ou como aditivo mineralizador/fundente no processo de sinterização. Resíduos com hidraulicidades latentes, como as escórias granuladas, de alto-forno ou cinzas de termelétricas, são utilizadas durante a moagem do cimento para a fabricação de cimentos de alto-forno (CP-III) e pozolânicas (CP-IV).

Os resíduos passíveis de serem co-processados em fornos de cimento devem obedecer aos seguintes critérios⁽⁵⁻⁸⁾:

- Não causar impacto ambiental: questão relacionada principalmente a natureza das emissões e aos limites de metais e gases emitidos pela indústria;
- Não interferir no processo de fabricação: operação do forno e as características do clínquer devem ser mantidas constantes;
- Não alterar a qualidade do cimento: os elementos menores nos resíduos podem atuar como fundentes e mineralizadores modificando a cinética de formação e reatividade das fases. Elementos como Cl, Zn, Cr, F, Cd, As, V, Pb, Cu, Hg e Sb devem ser controlados e limitados pelos seus efeitos no processo, na qualidade e na saúde.
- Não provocar danos à saúde ocupacional: sistemas e equipamentos de controle, manuseio e transporte devem ser instalados para assegurar a eficiência do processo e a proteção do trabalhador.

Dentre os materiais com restrições ao co-processamento destacam-se⁽⁵⁾:

- Materiais altamente corrosivos ($\text{pH} < 3$ ou > 12)
- Produtos radiativos
- Materiais com altos níveis de mercúrio e tálio
- Produtos químicos reativos como isocianatos e certos compostos de aminas
- Substâncias químicas altamente controversas como dioxinas e PCBs\ (Bifenil policlorados). São substâncias com excelentes propriedades lubrificantes, isolantes, refrigerantes e condutoras, conhecidas comercialmente como ascarel, pyranol e arochlor, que quando queimados sem medidas adequadas, podem transformar-se em dioxinas e furanos, gases muito venenosos.

3.3 O Forno Rotatório de Cimento

O forno é um reator químico de alta eficiência e produção que opera em condições de alta temperatura, em ambiente oxidante e em regime de alta turbulência.

As principais características que tornam um forno de cimento indicado para a destruição de resíduos perigosos são apresentadas a seguir⁽⁵⁾:

1. **Alta temperatura de incineração:** a temperatura da chama está próxima a 2.000°C e a temperatura dos sólidos a 1.450°C , na zona de queima.
2. **Tempo de residência:** de 6 a 10 segundos superior ao tempo de residência de um incinerador típico: 0 - 3 segundos.
3. **Ambiente básico:** a decomposição do carbonato, principal constituinte para a fabricação de cimento, propicia naturalmente um ambiente para a neutralização dos gases ácidos.
4. **Alta turbulência:** a turbulência expressa em número de Reynolds é de > 100.000 para um forno de cimento comparativamente maior do de um incinerador típico (> 10.000). O maior turbilhonamento dos gases permite uma maior eficiência na destruição de compostos orgânicos e inorgânicos.
5. **Carga de resíduo:** fornos de cimento típicos, tem em média uma capacidade de alimentação de matérias-primas de 100 t/hora. A carga de resíduos é geralmente

menos de 5% da alimentação (5t/h) e com o intenso contato entre os gases e o material fino da farinha e os resíduos são destruídos, neutralizados e parte absorvidos e incorporados nas estruturas cristalinas dos componentes do clínquer (silicatos cálcicos e aluminatos e ferro-aluminatos de cálcio).

6. **Equipamento de despoeiramento de alta-eficiência:** os fornos de cimento são dotados de precipitadores eletrostáticos de alta eficiência, que podem limitar a emissão de partículas sólidas com concentrações de elementos indesejáveis.

4 TENDÊNCIAS DO CO-PROCESSAMENTO

A aceleração do processo de normalização do co-processamento de resíduos em fornos de clínquer, tanto em nível federal (CONAMA) como estadual (São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul), somada à disponibilidade crescente de resíduos nos grandes centros industriais do país, constituem os grandes fatores impulsores do co-processamento.

O impacto da atividade de co-processamento na indústria de cimento se refletirá na substituição do combustível convencional em até 30%, proporcionando uma economia nos custos de fabricação. O uso de resíduos substituindo a matéria prima, principalmente nos constituintes utilizados como corretivos de Si, Al, Fe da mistura crua ou como agentes fundentes ou mineralizadores tem importante papel na diminuição do consumo de energia do processo.

O co-processamento terá grande desenvolvimento na região Sul e Sudeste do país, estimando-se que nos próximos anos a indústria co-processará nos fornos de clínquer aproximadamente 400.000 t/ano de resíduo.

A legislação ambiental tornará cada vez mais rigorosa, com limites de emissão e controle de metais pesados estreitos, acompanhando as mesmas tendências dos países desenvolvidos, condicionando um maior investimento da indústria em equipamentos de monitoramento e controle ambiental, e consequentemente uma indústria ambientalmente melhor ajustada.

O monitoramento da qualidade ambiental do clínquer como um produto industrial de qualidade técnica garantida, produzido dentro de um cenário ambientalmente correto, será a projeção da imagem da indústria de cimento do futuro compatibilizando o processo industrial de produção de clínquer com a destruição de resíduos perigosos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O avanço tecnológico na utilização de fornos de cimento como instrumento de ação para a proteção do meio ambiente tem sido acompanhado pelos órgãos ambientais como pela própria indústria. A experiência internacional mostra que se não houver um processo de conscientização e integração da indústria com os órgãos ambientais e com a comunidade, o co-processamento não terá sucesso no país.

O co-processamento de resíduos perigosos em fornos de clínquer não traz à sociedade uma solução definitiva para a gestão de resíduos, mas uma contribuição para o aproveitamento de resíduos pela sua valorização, como combustível alternativo ou como substituto de matéria prima, atenuando o impacto da exploração de bens minerais não renováveis.

O engajamento na discussão quanto à implantação futura da ISO 14000 na área de Mineração e de Processo evidencia a disposição da indústria em participar com maior

intensidade na questão da gestão ambiental e demonstra a sua responsabilidade com a Sociedade.

A indústria de cimento responde positivamente em prol do desenvolvimento sustentável, diminuindo sua atuação como geradora de poluição e cumprindo sua parcela de responsabilidade como instrumento alternativo da política de gestão ambiental de resíduos perigosos.

BIBLIOGRAFIA

- (1) MARCIANO JR, E., KIHARA, Y. e ESPER, W. Mário (1996) – A Questão Ambiental no Setor Cimenteiro – In. 4º Congresso Brasileiro de Cimento, São Paulo, novembro de 1996, ANAIS p.467 – 486.
- (2) MARCIANO JR, E. e KIHARA, Y. (1997) – Looking Green. World Cement., v. 28, n. 4, p. 82 – 88.
- (3) KIHARA, Y., BATTAGIN, A.F., ZAMPIERI, V.A., CENTURIONE, S.L. e PECCHIOP, M. (1990) – A microscopia do clínquer portland e seus benefícios tecnológicos. In: 2º Congresso Brasileiro de Cimento, São Paulo, novembro 1990, ANAIS.
- (4) WOLTER, A. (1985) – Influence of the kiln system on the clinker properties. Zement – Kalks – Gips, Wiesbaden, 37 (12): 327-29.
- (5) MOORE, E. T. (1995) – Co-processamento de insumos alternativos. In: Ciclo de Conferências da Indústria de Cimento, fabricação, Co-processamento e Meio Ambiente, Rio de Janeiro, Abril 1995 – ANAIS.
- (6) RIBEIRO, N. V. (1990) – A contribuição da indústria de cimento para o controle ambiental, produzida pelos resíduos sólidos - Aspectos gerais. In 2º Congresso Brasileiro de Cimento, São Paulo, Novembro de 1990, ANAIS p. 309 – 327.
- (7) YAMAMOTO, J.K., KIHARA, Y., COIMBRA, A.M. e MONTANHEIRO, T. A. (1997) – Environmental Impact Reduction on the Production of Blended – Portland Cement in Brazil. Environmental Geosciences v. 4 (4): 192 – 205
- (8) JAPAN Cement Association (1998) – Cement in Japan.
- (9) MANTUS, E. K. (1992) – Al Fired Up – Burning Mazardous waste in cement kilns. Environmental Toxicology International, 81.