

40ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação

Rio de Janeiro, RJ - 26 a 28 de outubro de 2010

PEÇAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO FOTOCATALÍTICAS PARA PAVIMENTAÇÃO E DEGRADAÇÃO DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NO_x) PRESENTES NA ATMOSFERA

Glicério Trichês¹;

João Victor Staub de Melo²; Philippe J. P. Gleize³ & Joe Villena⁴

RESUMO

A poluição do ar nos grandes centros urbanos se tornou um grande problema mundial. Dentre os poluentes, pode-se destacar como um dos grandes percussores da falta de qualidade do ar nas metrópoles, os óxidos de nitrogênio (NO_x) provenientes de ações antrópicas. Uma abordagem promissora para solucionar as elevadas concentrações dos óxidos de nitrogênio (NO_x) é a conversão fotoquímica do NO_x em íons de nitratos, a partir da oxidação fotocatalítica heterogênea, utilizando o dióxido de titânio (TiO₂) como fotocatalisador. A adição de um fotocatalisador em materiais de construção comuns, tais como o concreto, gera materiais amigáveis do meio ambiente, reduzindo a poluição do ar.

Este trabalho aborda a problemática ambiental causada pelas altas concentrações dos NO_x nas grandes cidades e apresenta uma revisão da literatura sobre a utilização de peças pré-moldadas de concreto fotocatalíticas para pavimentação e degradação dos NO_x através dos processos oxidativos avançados (POA). Neste sentido, é descrito uma visão geral do princípio da fotocatalise e a aplicação em combinação com o cimento, bem como os resultados das pesquisas de laboratório, na degradação de óxidos de nitrogênio. Estudos experimentais apontam uma grande eficiência das peças fotocatalíticas na degradação dos óxidos de nitrogênio, podendo alcançar taxas de conversão do poluente (NO_x) de até 90%.

PALAVRAS-CHAVE: Poluição Atmosférica; Óxidos de Nitrogênio; Peças de Concreto; Fotocatálise Heterogênea; Dióxido de Titânio.

ABSTRACT

The pollution of the air in the major urban centres has become a big world problem. Among the pollutants, it is pointed out as one of the great precursors of the lack of air quality in the metropolis, the nitrogen oxides (NO_x) that come from man actions. A promising approach to solve the high concentrations of nitrogen oxides it is the photochemical conversion of the NO_x into nitrate ions, from the heterogenic photocatalytic oxidation, using the titanium dioxide (TiO₂) as photo catalyser. The adding of a photo catalyser in materials of common constructions, such as concrete, generates friendly materials of the environment, reducing the air pollution.

This paper approaches the environmental problematic caused by the high concentrarions of the NO_x in the cities and presents a review of the literature about the utilization of photocatalytic concrete blocks for paving and degradation of the NO_x through the advanced oxidation processes (AOP). In this way, it is described a general view of the photocatalysis principle and the application in combination with the cement, as well as the results of the laboratory researches, in the degradation of nitrogen oxides. Experimental studies point to a great efficiency of photocatalytic blocks in the degradation of the nitrogen oxides, with chances of reaching up to 90% in the conversion rates of the pollutant.

KEY WORDS: Air Pollution; Nitrogen Oxides; Concrete Blocks; Heterogeneous Photocatalysis; Titanium Dioxide.

¹ Professor do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina - ecv1gttri@ecv.ufsc.br

² Mestrando do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina - victor@ecv.ufsc.br

³ Professor do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina - ecv1phg@ecv.ufsc.br

⁴ Doutorando do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina - villena@ecv.ufsc.br

INTRODUÇÃO

A poluição do ar causada pelo rápido desenvolvimento urbano se tornou uma grande preocupação em todo planeta, originando uma série de programas e regulamentos a serem implementados para reduzi-la.

Dentre as substâncias causadoras da poluição atmosférica, se destacam como resultado da combustão em centrais elétricas, automóveis, caminhões e ônibus, o monóxido de nitrogênio (NO). Uma vez na atmosfera, o monóxido de nitrogênio (NO) é oxidado gradualmente para dióxido de nitrogênio (NO₂) (FREEDMAN, 1995).

O aumento da emissão de gases como os óxidos de nitrogênio (NO_x) pode causar chuva ácida, ozônio ao nível do solo (troposférico), contribuir com o aquecimento global, além de causar agravos à saúde humana. Este problema se intensifica nas grandes metrópoles onde se tem grande concentração destes gases (LEITE *et al.*, 2008).

Atualmente um dos métodos mais estudados para o combate da poluição do ar em grandes cidades (Omia, Bruxelas, Antwerpia, Paris, Bergamo, Hong Kong, entre outras) é a oxidação fotocatalítica avançada que utiliza semicondutores. Pode-se citar como semicondutores inorgânicos o dióxido de titânio (TiO₂), o óxido de zinco (ZnO), o sulfeto de cádmio (CdS), entre outros. Estudos demonstram que a incorporação de dióxido de titânio (TiO₂) em argamassas usadas na superfície de peças pré-moldadas de concreto (PPC) para pavimentação, é uma tecnologia promissora para a fotodegradação dos óxidos de nitrogênio (NO_x), contribuindo para a redução da poluição ambiental.

O princípio de funcionamento do processo de fotodegradação é baseado nas propriedades do semicondutor (TiO₂). Elétrons são transferidos a partir da banda de valência para a banda de condução por fótons do espectro solar (faixa UV-A). A absorção dessa energia (fótons) cria buracos de elétrons que são responsáveis pela formação de radicais hidroxilas (•OH) no semicondutor. Estes radicais formados atuam como um oxidante forte, degradando compostos orgânicos e inorgânicos. No caso dos óxidos de nitrogênio estes são absorvidos na superfície do fotocatalisador e degradados pelos radicais hidroxilas formados (ZHAO e YANG, 2002).

O produto da reação de degradação dos óxidos de nitrogênio são íons de nitrato. Esses íons são liberados a partir da superfície do fotocatalisador como ácido nítrico fraco. A remoção dos produtos da reação na superfície é realizada pela água da chuva já que estes são solubilizados (neutralizados) em meio aquoso. Deste modo, o processo de remoção do poluente se dá somente pela ação da energia natural.

POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Nas últimas décadas o aumento e a concentração da população humana nas grandes metrópoles têm gerado efeitos positivos, como o progresso econômico e tecnológico. Contudo, esses benefícios provocaram uma série de conseqüências ambientais desfavoráveis, que resultam na contaminação do ar por uma variedade de poluentes, originados de fontes estacionárias e móveis, principalmente a partir da queima de combustíveis fósseis.

Para Almeida (1999), a poluição atmosférica inclui todo tipo de atividade, fenômeno ou substância que contribua para a deterioração da qualidade natural da atmosfera, causando males aos seres humanos e ao meio ambiente.

Os principais poluentes atmosféricos podem ser classificados em duas categorias: os poluentes primários, sendo aqueles diretamente emitidos pelas fontes de poluição, e os poluentes secundários,

formados na atmosfera através da reação química entre poluentes primários e os constituintes naturais da atmosfera (PEDROSO, 2007).

Segundo Lou *et al.* (1993), óxidos sulfurosos (SO_x), hidrocarbonetos (HC), partículas em suspensão (PS), monóxido de carbono (CO) e os óxidos de nitrogênio (NO_x) são os cinco poluentes primários na atmosfera. Os óxidos de nitrogênio normalmente encontrados na atmosfera são o monóxido de nitrogênio ou óxido nítrico (NO), o dióxido de nitrogênio (NO₂) e o óxido nitroso (N₂O), designados coletivamente por NO_x. Os NO_x podem ter origens de fontes naturais como processos biológicos ou de fontes antrópicas como motores de combustão, fornos industriais, incineradores, indústrias de cal, de fertilizantes e das grandes queimadas (MANAHAN, 1994).

Efeitos dos Óxidos de Nitrogênio na Atmosfera

As altas concentrações de óxidos de nitrogênio (NO_x) na atmosfera, além de causar danos à saúde humana, são responsáveis também pela formação da chuva ácida, do ozônio (O₃) ao nível do solo e na contribuição ao aquecimento global.

Segundo o *Worldwide Fund for Nature* (WWF), cerca de 35% dos ecossistemas europeus já estão seriamente alterados e cerca de 50% das florestas da Alemanha e da Holanda estão destruídas pela acidez da chuva. Na costa do Atlântico Norte, a água do mar está entre 10% e 30% mais ácida que nos últimos vinte anos. Nesta mesma perspectiva, Machado (2007), ressalta que em Cubatão, São Paulo, as chuvas ácidas contribuem para a destruição da Mata Atlântica e escorregamento de encostas. Monumentos históricos também estão sendo corroídos: a Acrópole, em Atenas; o Coliseu, em Roma; o Taj Mahal, na Índia; as catedrais de Notre Dame, em Paris e de Colônia, na Alemanha.

Quanto à formação do ozônio troposférico, Negri (2002), destaca que a presença de óxidos de nitrogênio (NO_x) na atmosfera e hidrocarbonetos não reativos (não metanos) sob luz solar podem formar compostos fotoquímicos, em particular o ozônio no nível do solo.

Segundo Martins (2006), ozônio é um gás oxidante e quando presente na estratosfera tem a função benéfica de filtrar os raios ultravioletas do sol que chegam à superfície terrestre. Contudo, quando presente na troposfera e em concentrações maiores que as naturais (10-20 ppbv), exercem diversos efeitos nocivos à saúde humana e ao ecossistema. Além disso, para o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (2001), o ozônio troposférico tem um significativo impacto na qualidade do ar e nas mudanças climáticas, uma vez que é um dos gases que contribui com o efeito estufa.

Para Bergin *et al.* (1998), estudos têm mostrado que em muitas áreas do mundo o padrão de qualidade de ar com relação ao ozônio não pode ser alcançado sem uma significativa redução das emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs).

Cidades americanas como Los Angeles, Denver e Phoenix têm tido problemas com tais reações fotoquímicas. A única forma de solução é reduzir a emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) e de hidrocarbonetos. Os NO_x podem viajar longas distâncias, contribuindo para a formação de ozônio e depósitos ácidos longe do ponto de origem da emissão (NEGRI, 2002).

De acordo com os monitoramentos da CETESB (2000), na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), o ozônio ultrapassa freqüentemente o padrão de qualidade do ar de 160 µg/m³ (82 ppb), estabelecido pela Lei Estadual 8.468, de 1976. E por diversas vezes supera o valor de 200 µg/m³ (102 ppb), o que determina uma má qualidade do ar, destacando-se, atualmente, como o poluente com maior número de ultrapassagens do padrão.

Contribuindo com 8% para o aquecimento global, o ozônio (O_3) é um gás formado na baixa atmosfera, sob estímulo do sol, a partir de óxidos de nitrogênio (NO_x) e hidrocarbonetos produzidos em usinas termoelétricas, pelos veículos, pelo uso de solventes e pelas queimadas.

Segundo o relatório de Stern (2006), as mudanças climáticas podem causar a maior recessão global desde a Grande Depressão. Conforme o documento, o aquecimento global poderá custar à economia mundial até 20% do Produto Interno Bruto (PIB) anual do planeta nas próximas décadas, se não forem tomadas medidas urgentes para reduzir as emissões de gases causadores do efeito estufa. “Implementar e adotar ações de redução destas emissões poderá custar até 1% do PIB global, mas os custos da não ação deverão ser ainda maiores” (STERN, 2006).

FOTOCATÁLISE

Para Higarashi *et al.*, (2000 *apud* HASSEMER, 2006), os processos de oxidação avançada têm-se destacado nos últimos anos como uma tecnologia alternativa ao tratamento de várias matrizes ambientais. A grande vantagem desses processos reside no fato do contaminante não ser simplesmente transferido de fase, mas sim, degradado através de uma série de reações químicas.

Os processos oxidativos avançados (POA) são definidos como aqueles capazes de gerar radicais hidroxila ($\bullet OH$) em quantidades suficientes para degradar compostos poluentes. Esses processos podem ser homogêneos ou heterogêneos e utilizar ou não a radiação UV.

A geração dos radicais é o passo fundamental para a eficiência dos Processos Oxidativos Avançados (POA). Quanto mais eficientemente estes radicais forem gerados, maior será o poder oxidativo (MUNTER, 2001; DEZOTTI, 1998).

A Tabela 1 lista os potenciais de redução de alguns radicais gerados nos Processos Oxidativos Avançados (POA). Observa-se que o radical hidroxila ($\bullet OH$) é um forte oxidante, perdendo para o fluoreto, superando o permanganato, o Cr (VI), o ozônio (O_3) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Por outro lado, o radical superóxido ($\bullet O_2^-$) e o radical peridroxil ($\bullet HO_2$) são agentes redutores (LIMA, 1998).

Tabela 1. Potencial-Padrão de Redução

	Potencial-Padrão de Redução (v)
Fluor (F_2)	+3,06
Radical Hidroxila ($\bullet OH$)	+2,77
Ozônio (O_3)	+2,07
Peróxido de Hidrogênio (H_2O_2)	+1,77
Permanganato (MnO_4^-)	+1,67
Cr (VI)	+1,33
Radical Peridroxil ($\bullet HO_2$)	-0,30
Radical Superóxido ($\bullet O_2^-$)	-0,33

(Fonte: DEZOTTI, 1998)

Fotocatálise Heterogênea

Esta tecnologia de oxidação está baseada na irradiação de um catalisador sólido, geralmente um semicondutor, e pode ser realizada em vários meios: fase gasosa, fases orgânicas líquidas puras ou soluções aquosas (ALVES, 2008).

Para Zhao e Yang (2002), o princípio da fotocatalise heterogênea envolve a ativação de um semicondutor (TiO_2) por luz solar ou artificial. O semicondutor é caracterizado por bandas de

valência (BV) e bandas de condução (BC) sendo a região entre elas chamada de “band gap”. Uma representação esquemática da partícula do semicondutor é mostrada na Figura 1.

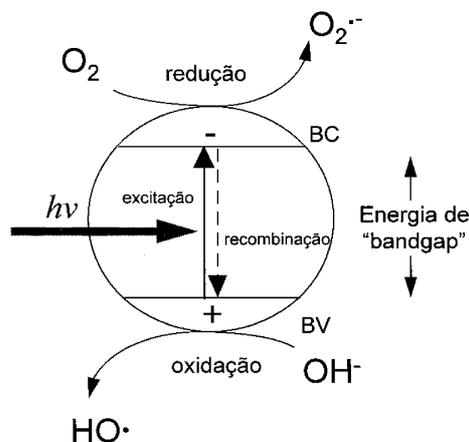


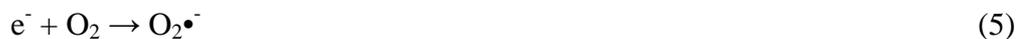
Figura 1. Fotocatálise Heterogênea: Partícula do Semicondutor (LACEY e SCHIRMER, 2008).

A absorção de fótons com energia superior à energia de “bandgap” (quantidade mínima requerida para excitar o elétron) resulta na promoção de um elétron da banda de valência para a banda de condução com geração concomitante de uma lacuna (h^+) na banda de valência. Estas lacunas mostram potenciais de redução bastante positivos, na faixa de +2,0 a +3,5 V. Este potencial é suficientemente positivo para gerar radicais hidroxilas ($\bullet\text{OH}$) a partir de moléculas de água adsorvidas na superfície do semicondutor (equações de 1 a 3), os quais podem subseqüentemente oxidar contaminantes.

A eficiência da fotocatalise depende da competição entre o processo em que o elétron é retirado da superfície do semicondutor e o processo de recombinação do par elétron/lacuna o qual resulta na liberação de calor (equação 4) (ROMERO *et al.*, 1999):



Estudos mais recentes têm demonstrado que o mecanismo de degradação não se dá exclusivamente através do radical hidroxila, mas também através de outras espécies de radicais derivadas de oxigênio ($\text{O}_2\bullet^-$, $\text{HO}_2\bullet$, etc.) formadas pela captura de elétrons fotogerados:



Um dos aspectos interessantes da fotocatalise heterogênea é a possibilidade de utilização da radiação solar para ativação do semicondutor. Essa radiação necessária para excitação do elétron também pode ser proporcionada por uma lâmpada de luz negra (PARRA, 2001).

Semicondutores

Um semicondutor é caracterizado por apresentar uma estrutura em que a banda de menor energia (preenchida) é chamada de banda de valência (BV), e a outra (mais energética) desocupada, é chamada de banda de condução (BC). A diferença de energia que separa as bandas de valência e de condução é conhecida como energia de “band gap” (E_g). Alguns semicondutores são mais comumente utilizados como sensibilizadores na fotocatalise heterogênea, dentre os quais pode-se

citar: sulfeto de cádmio, óxido de estanho, óxido de ferro, óxido de tungstênio, óxido de zinco e dióxido de titânio (SILVA, 2007).

De acordo com Alves (2008), quanto ao fornecimento de radiação, cada semicondutor tem energia mínima necessária para que o elétron seja promovido da banda de condução (BC) para a banda de valência (BV) ($E_{bandgap}$) e essa energia está associada a um comprimento de onda, conforme apresentado na Tabela 2. O comprimento de onda necessário para ativar o catalisador deve ser igual ou inferior ao calculado pela equação de Planck (equação 7):

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_{bg}} \quad (7)$$

onde:

$E_{bg} = h \nu$: energia de “band gap” ou energia de ativação ($TiO_2 = 3,2 \text{ eV}$);

h : é a constante de Planck = $4,136 \times 10^{-15} \text{ (eV.s)}$;

c : é a velocidade da luz = $2,998 \times 10^8 \text{ (m/s)}$;

λ : é o comprimento de onda.

Tabela 2. Posição das Bandas e Comprimento de Onda de Semicondutores

Semicondutor	Potencial de Redução BV (V)	Potencial de Redução BC (V)	Band Gap E (eV)	Band Gap λ (nm)
TiO ₂	+3,1	-0,1	3,2	387
SnO ₂	+4,1	+0,3	3,9	318
ZnO	+3,0	-0,2	3,2	387
ZnS	+1,4	-2,3	3,7	335
CdS	+2,1	+0,4	2,5	496

(Fonte: MORAIS, 2005)

De acordo com Santos (2007), o sol emite energia em, praticamente, todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético. De toda energia emitida, 38,5% se concentra entre 400 e 700 nm, denominado espectro visível de energia. O restante é dividido entre radiação ultravioleta (< 400 nm) com cerca de 8,9%, infravermelho próximo (entre 700 e 1500 nm) com 39% e infravermelho (> 1500 nm) com 12,6%. Menos de 1% da radiação emitida concentram-se acima da região das microondas e ondas de rádio, e abaixo da ultravioleta, como Raios-X e raios gama (Tabela 3).

Tabela 3. Irradiância nas Faixas do Espectro Solar

Faixa de λ (nm)	Irradiância (w/m^2)	%
UV-C (< 280)	6,83	0,5
UV-B (280-315)	19,12	1,4
UV-A (315-400)	95,62	7,0
Luz Visível (400-700)	525,91	38,5
Infravermelho (> 700)	704,86	51,6
Outras	13,66	1,0
TOTAL	1366,0	100

(Fonte: SANTOS, 2007)

Dióxido de Titânio (TiO₂)

Lim *et al.* (2000), ressaltam que o dióxido de titânio (TiO₂) apresenta três estruturas cristalinas: anatase (tetragonal), rutilo (tetragonal), e brookite (ortorrômbica) (Figura 2). A aplicação de TiO₂, na forma de anatásio, como purificador de ar foi impulsionado no Japão em 1996. O tipo anatase é

mais amplamente usado porque tem uma maior eficiência como fotocatalítico que os outros tipos de TiO_2 (MGUIG *et al.*, 2004).

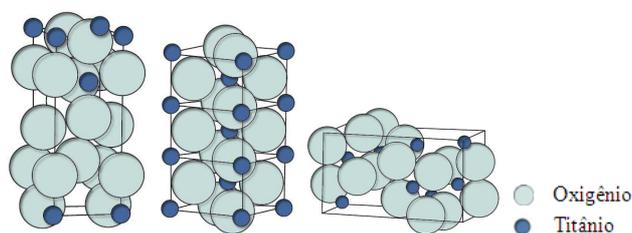


Figura 2. Estrutura das Fases de TiO_2 : (a) anatase, (b) rutilo e (c) brookite (SUWA *et al.*, 1984).

A atividade do catalisador (TiO_2) é influenciada por diversos fatores tais como: morfologia do cristal, área superficial da partícula, capacidade de adsorção e prevenção da recombinação dos pares elétron/lacuna. Dentre as estratégias para melhorar a atividade fotocatalítica do TiO_2 estão a modificação da superfície específica e a dopagem com íons metálicos e substâncias capazes de transferir carga ao semicondutor (CANDAL *et al.*, 2001 *apud* FERREIRA, 2005).

PEÇAS PRÉ-MOLDADAS DE CONCRETO FOTOCATALÍTICAS PARA PAVIMENTAÇÃO

Segundo Chen e Poon (2009), as PPC para pavimentação apresentam superfícies ótimas para aplicar materiais fotocatalíticos pela configuração relativamente plana e por facilitar a exposição à luz solar. Além disso, a natureza da matriz do cimento é particularmente satisfatória para incorporar partículas de TiO_2 .

Para Murata e Tawara (1999 *apud* BEELDENS, 2008), no caso de PPC para pavimentação, a anatase (tipo de TiO_2) é colocada na camada superficial da peça, com espessura variando de 3 a 8 mm. Watts e Cooper (2008) relatam que aplicação do TiO_2 em combinação com o cimento, conduz a partir dos radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) formados uma transformação dos óxidos de nitrogênio (NO_x) em íons de nitrato (NO_3^-) (equações 8 a 10) os quais são absorvidos pela superfície do concreto, e solubilizado através da água da chuva, sendo substâncias inócuas ao meio ambiente.



Conforme Poon e Cheung (2007), as PPC fotocatalíticas consistem em um concreto de base e uma camada superficial contendo TiO_2 (Figura 3). Para a camada superficial, a proporção de cimento em relação aos agregados é 1:3. Quanto ao TiO_2 , este é adicionado à mistura de 3 a 10% em peso de cimento.



Figura 3. Peças Pré-Moldadas com Argamassa Fotocatalítica (HÜSKEN *et al.*, 2009).

Aparato Para Medição da Eficiência Fotocatalítica

Husken *et al.* (2009), em seus estudos de desempenho da atividade fotocatalítica em PPC desenvolveram um aparato de teste representado no esquema da Figura 4.

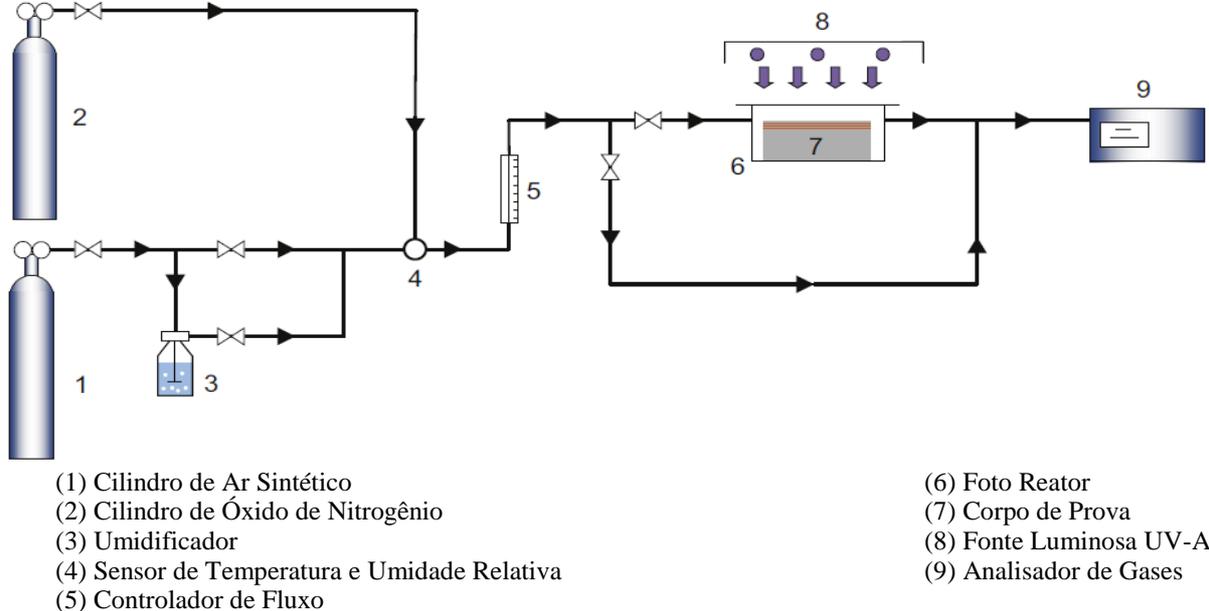


Figura 4. Aparato para Avaliação da Atividade Fotocatalítica (HÜSKEN *et al.*, 2009).

De acordo com Hüsken *et al.* (2009), o procedimento para a avaliação fotocatalítica pode ser descrito da seguinte forma: inicialmente são liberadas uma certa quantidade de ar sintético e NO, onde o ar passa por um processo de umidificação. Logo, os dois gases são misturados e injetados em fluxo contínuo no fotoreator. Durante o teste, a iluminação é ligada com a finalidade de iniciar a atividade fotocatalítica do dióxido de titânio para a degradação dos poluentes. Finalmente, um analisador de gases instalado na saída do fotoreator encarrega-se de medir a concentração de NO_x no fluxo de gases.

Resultados da Fotocatálise em Peças Pré-Moldadas de Concreto (PPC)

Beeldens (2008) verificou o desempenho das PPC (100 x 150 mm) com 3 mm de argamassa fotocatalítica na remoção de NO_x. Em seu procedimento laboratorial utilizou umidade relativa do ar de 50%. Na primeira meia hora de teste, estabeleceu uma concentração na câmara do fotoreator de 1 ppmv de NO sem radiação. Após, a PPC foi exposta a cinco horas de radiação UV-A (10 w/m²) e a um fluxo (3 l/min) com uma concentração de 1 ppmv de NO. O teste é finalizado com meia hora de iluminação e sem exposição ao fluxo de NO. Os resultados das peças com 150 cm² de área fotocatalítica, mostram uma redução de 40% (0,4 ppm) do poluente NO e a formação de aproximadamente 0,1 ppm de NO₂ pela oxidação do NO na presença de oxigênio (O₂). Pode-se observar na Figura 5 toda a evolução do ensaio desenvolvido, assim como os resultados obtidos.

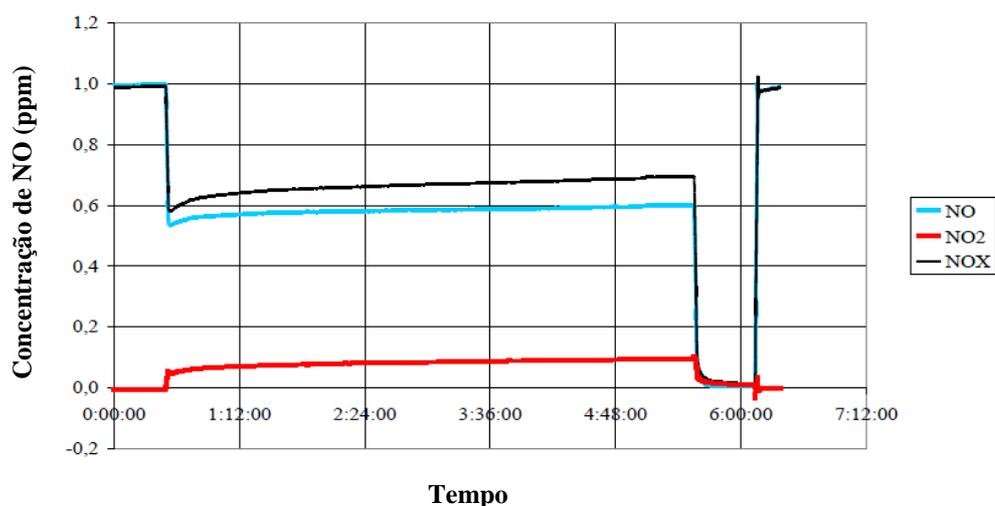


Figura 5. Resultado da Remoção de NO_x Através de Bloco de Concreto Fotocatalítico (BEELDENS, 2008).

Chen, Li e Yua (2007), em experimentos realizados em placas de concreto fotocatalíticas (100 x 60 x 10 cm) sob condições de radiação UV-A de 250 W/m², concentração de NO de 2,0 ppm e utilizando semicondutor TiO₂ (Degussa P-25), obtiveram 33,33 mg/cm² de remoção de NO.

A Figura 6 pode-se observar que em menos de 5 min de ensaio, sob uma concentração constante de NO de 2 ppmv, houve uma queda da concentração do poluente para, aproximadamente, 0,16 ppmv a qual persistiu até o final do ensaio.

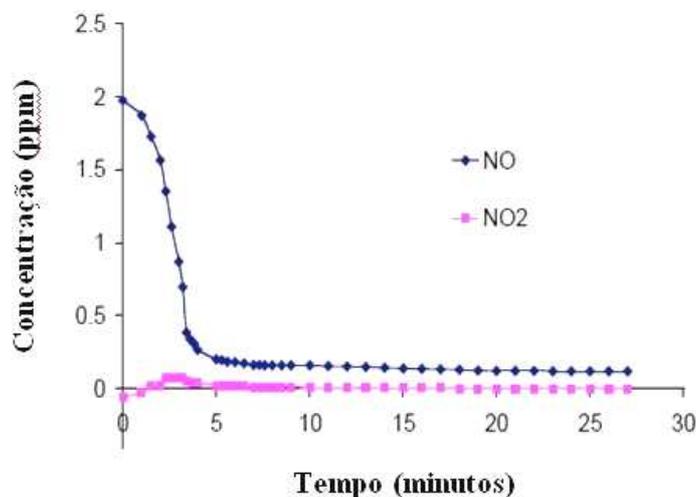


Figura 6. Concentração de NO e NO₂ ao Longo do Ensaio (CHEN, LI e YUAN 2007)

Em termos de taxa de conversão, as placas desenvolvidas por Chen, Li e Yuan (2007), mostram uma grande eficiência, chegando a uma porcentagem de conversão do poluente maior que 90%, e que se manteve durante a realização do experimento, como se pode verificar na Figura 7.

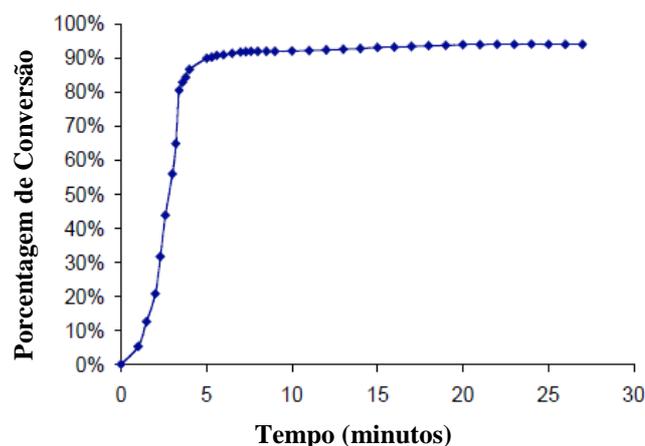


Figura 7. Taxa de Conversão do Poluente (CHEN, LI e YUAN 2007).

Brouwers e Hüsken (2008) avaliaram a influência da superfície específica do TiO_2 na degradação de NO. Para esta análise, utilizaram dois tipos de TiO_2 : Um com partículas mais grossas (TiO_2 A) com superfície específica de $7916 \text{ cm}^2/\text{g}$; e outro, com maior área de superfície específica, de $11910 \text{ cm}^2/\text{g}$ (TiO_2 B).

Nos ensaios realizados, utilizaram vazão de 3 l/min , umidade relativa de 50%, radiação UV-A de 10 W/m^2 e uma concentração de poluente de 1 ppmv . Os resultados dos testes demonstraram claramente que o TiO_2 B (maior área específica) apresenta rendimento maior nas taxas de conversão do que o TiO_2 A (menor área específica) (Figura 8).

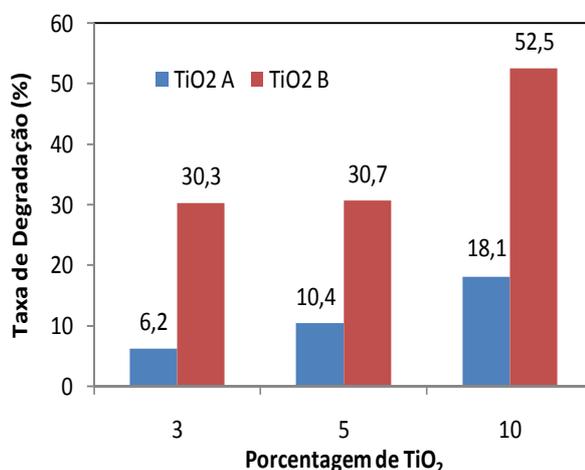


Figura 8. Resultados da Degradação de NO (BROUWERS e HÜSKEN, 2008).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os monitoramentos da qualidade do ar nas grandes cidades demonstram que a problemática atual das altas concentrações dos óxidos de nitrogênio, assim como, seus efeitos causados é de grande preocupação para a qualidade de vida do ser humano e para o equilíbrio ambiental. Nesta perspectiva, a investigação e produção de novos materiais amigáveis ao meio ambiente ganharam grande importância mundial. A oxidação fotocatalítica heterogênea parece ser uma técnica promissora para redução da poluição atmosférica em áreas urbanas com altas emissões de óxidos de nitrogênio. Neste sentido, vários estudos experimentais comprovam que a concentração de óxidos de nitrogênio pode ser efetivamente reduzida a partir de superfícies fotocatalíticas. Neles, foi

observado que a adição de TiO_2 em peças pré-moldadas de concreto adiciona a propriedade de purificação do ar no pavimento, degradando os óxidos de nitrogênio (NO_x). Esta propriedade é obtida quando na superfície do bloco é adicionado o dióxido de titânio e esta é exposta à luz UV-A (presente na luz do dia).

Com base nos estudos e resultados atuais das peças pré-moldadas na degradação dos NO_x , a investigação ainda é recomendada para avaliar a eficiência da tecnologia no campo, as interferências das condições climáticas locais na fotocatalise, assim como, a durabilidade e resistência ao desgaste do revestimento de TiO_2 em serviço.

Neste contexto abordado, a pavimentação com peças pré-moldadas de concreto (PPC) fotocatalíticas, pode ser considerada uma relevante tecnologia para contribuir com a minimização dos poluentes atmosféricos. Com sua grande diversidade de formatos, cores e modos de aplicação, os “*pavers*” (PPC) apresentam grande atrativo para pavimentação de calçadas, estacionamentos, praças, áreas de lazer e ruas de baixo e médio volume de tráfego. Além de serem superfícies ótimas para aplicar materiais fotocatalíticos pela configuração relativamente plana e por facilitar a exposição à luz solar.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e CAPES pelo apoio financeiro e bolsas.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, I. T. **A Poluição Atmosférica por Material Particulado na Mineração a Céu Aberto**. Dissertação. 194f. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1999.
- ALVES, A. K. **Obtenção de Micro e Nanofibras de TiO_2 Por Electrospinning: Caracterização de Propriedades e Atividade Fotocatalítica**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2008.
- BEELDENS, A. **Air Purification by Pavement Blocks: Final Results of The Research at The BRRC**. Transport Research Arena Europe, Ljubljana. 2008.
- BERGIN, M. S. et al. **Quantification of Individual VOC Reactivity Using a Chemically Detailed, Three-Dimensional Photochemical Model**. Environmental Science e Technology 29. 1998.
- BROUWERS, H. J. H; HÜSKEN, G. **Air purification by Cementitious Materials: Evaluation of Air Purifying Properties**. International Conference on Constuction And Building Technologic – ICCBT. University of Twente, The Netherlands. Pág. 263-274, 2008.
- CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Estudo do Comportamento do Ozônio na Região Metropolitana de São Paulo**. Departamento de Qualidade Ambiental. São Paulo. 2000.
- CHEN, D. H.; LI, K; YUAN, R. **Photocatalytic Coating on Road Pavements/Structures for NO_x Abatement**. Photocatalysis & Solar Processing Laboratory, Office of Air Quality Planning and Standards, Texas Air Research Center, Lamar University. Jan, 2007.
- CHEN, J; POON, C.-S. **Photocatalytic Construction and Building Materials: From Fundamentals to Applications**. Building and Environment, Departamento de Engenharia Civil e Estrutural, Universidade Politécnica de Hong Kong, 2009.
- FREEDMAN, B. **The Ecological Effects of Pollution, Disturbance and Other Stresses**. Environmental Ecology. Academic Press Inc. San Diego. 1995.
- HIGARASHI, M. M.; MOREIRA, J. C.; OLIVEIRA, A. S.; FERREIRA, L. F. V. **A Utilização de Processos Oxidativos Avançados na Descontaminação do Meio Ambiente**. *Química - Boletim SPQ*. Lisboa. N°79, p.16-20. 2000.
- HÜSKEN G, et al. **Experimental Study of Photocatalytic Concrete Products for Air Purification**. Building and Environment, Holanda, 2009.

- IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. In **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2001.
- LACEY, M. E. Q; SCHIRMER, W. N. **O Uso da Fotocatálise para a Desinfecção e Desodorização do Ar Interno**. *Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais* V. 4, Nº 2, Maio/Ago, 2008.
- LEITE, A. B. *et al.* **Processo de Absorção de Gases na Minimização da Poluição Atmosférica**. Departamento de Engenharia Química da Universidade Regional de Blumenau - FURB. 2008.
- LOU, J. C; CHUNG, K. F; CHEN, K. S. **An Optimization Study of Total Emission Controls for Particulate Pollutants**. *Journal of Environmental Management*, pp. 17-28, vol.43. 1993.
- MACHADO, M. **Chuva Ácida**. Portal Amanatureza - Ajuda ao Meio Ambiente. 2007. Disponível em: <<http://amanatureza.com/conteudo/artigos/chuva-acida>>.
- MANAHAN, S. E. **Environmental Chemistry**. 6 ed. 1994.
- MARTINS, L. D. **Sensibilidade da Formação do Ozônio Troposférico às Emissões Veiculares na Região Metropolitana de São Paulo**. Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo. 2006.
- MORAIS, J. L. **Estudo da Potencialidade de Processos Oxidativos Avançados, Isolados e Integrados com Processos Biológicos Tradicionais, Para Tratamento de Chorume de Aterro Sanitário**. Tese de Doutorado. 207 fl. Universidade Federal do Paraná-UFPR, Programa de Pós-Graduação em Química, Curitiba. 2005.
- NEGRI, J. C. **Modelo Preditivo da Emissão e Dispersão do NOx Gerado em Usinas Termoeletricas como Instrumento de Análise de Inserção e Capacidade de Suporte Regional da Qualidade do Ar**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo - USP. 2002.
- PAGNUSSAT, D. T. **Utilização de Escória Granulada de Fundação (EGF) em Blocos de Concreto Para Pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2004.
- PEDROSO, A. N. V. **Poluentes Atmosféricos e Plantas Bioindicadoras**. Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente Instituto de Botânica – IBT. São Paulo. 2007.
- POON, C. S.; CHEUNG, E. **NO Removal Efficiency of Photocatalytic Paving Blocks Prepared With Recycled Materials**. *Construction and Building Materials* 21, 1746–1753. 2007.
- ROMERO, M. *et al.* **Solar Photocatalytic Degradation of Water and Air Pollutants: Challenges and Perspectives**. *Solar Energy*, Vol. 66, Nº 2, Pag. 169-182. Espanha, 1999.
- SANTOS, S. K. **Processo Fotocatalítico Acoplado à Microfiltração para Degradação de Poluentes Orgânicos Recalcitrados**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ. 2007.
- SILVA, L. P. **Modificação e Imobilização de TiO₂ Visando a Degradação de Compostos Orgânicos Poluentes Via o Processo de Fotocatálise Heterogênea**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Química, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2007.
- STERN, N.. **Stern Review Report on the Economics of Climate Change**. 2006. Disponível em: <http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm>. Acesso: 12 de fevereiro de 2010.
- WWF. WORLDWIDE FUND FOR NATURE. Fundo Mundial para Natureza. Disponível em: <www.panda.org>. Acesso: 20 de fevereiro de 2010.
- ZHAO, J; YANG, X. **Photocatalytic Oxidation for Indoor Air Purification: A Literature Review**. *Building and Environment*, Departamento de Engenharia Civil, Ambiental e Arquitetura, Universidade de Miami. USA, 2002.