

## ACÇÃO DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS SOBRE OS MATERIAIS PÉTREOS

Wagner José Medeiros Ribeiro<sup>1</sup>; Felisbela Maria da Costa Oliveira<sup>2</sup>; Thaíse Maria Fontes Kalix<sup>2</sup>

**RESUMO** - A atividade antrópica tem lançado grande quantidade de poluentes na atmosfera como CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, compostos orgânicos voláteis (COV<sub>s</sub>), ozônio produzido pelo “smog” fotoquímico, aerossóis contendo H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>, NaCl, HNO<sub>3</sub>, HCl, ácidos orgânicos, e particulado sólido, que atuam sobre o meio ambiente e suas edificações. Mecanismos de ação destes poluentes causam o decaimento das rochas. A principal ação destes poluentes está associada à geração de ácidos a partir de processo de deposição úmida (CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>) e a seca (SO<sub>x</sub>), combinados com água meteórica. A presença de traços de ácidos fortes HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl, levam as águas a pH inferiores a 5. Ácidos derivados, sulfúrico e nítrico, são formados durante o transporte da massa de ar que os contem. Nas cidades, estes ácidos agem associados, potencializando seus efeitos sobre os materiais de revestimento gerando decaimento da rocha. O significativo aumento na velocidade de decaimento do material rochoso está associado ao crescimento da quantidade de gases poluentes (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO e NO<sub>2</sub>) e ao aumento de temperatura provocada pelo efeito estufa. Reações como dissolução, hidrólise, óxido-redução, potencializadas pelos poluentes acima descritos, alteram a composição química e mineralógica modificando as propriedades da rocha. Dentre estas reações destacam-se aquelas onde minerais são parcial ou totalmente consumidos, caso de dissolução total por águas ácidas dos anfibólios e piroxênios; a arenização das rochas quartzo-feldspáticas, granito-gnaissóides, sulfatação em rochas carbonáticas, caulínização sofrida pelos feldspatos e feldspatóides, e a cloritização dos minerais ferromagnesianos, principalmente as biotitas. Cada poluente tem importante papel nos processos de alteração, destacando-se NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> que acidificam as águas promovendo o decaimento. A associação destes (HCl, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), notadamente por via úmida, provoca patologias (crostas negras, eflorescências) comprometendo a estrutura macro e microscópica, resistência e durabilidades das rochas empregadas nas edificações e monumentos.

**Palavras-chave:** Poluentes atmosféricos; material pétreo; chuva ácida; implicações ambientais; decaimento.

---

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Pernambuco, IFPE. Av. Prof. Luiz Freire, 500. Cidade Universitária, Recife, PE. E-mail: [wagneribiero@yahoo.com.br](mailto:wagneribiero@yahoo.com.br)

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco. Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Recife, PE. E-mail: [felisbela.oliveira@ufpe.br](mailto:felisbela.oliveira@ufpe.br)

## 1. INTRODUÇÃO

Nossa atmosfera, a camada gasosa que envolve o planeta, este orbital gasoso que envolve a Terra corresponde a uma mistura de gases e vapores que se estende desde a superfície do planeta até cerca de 50 km. Pode-se, portanto, dividi-la em troposfera e estratosfera, onde a troposfera compreende a porção que se estende desde a superfície da terra até 15 km, e a estratosfera, a porção que se estende de 15 a 50 km.

De modo geral, nossa atmosfera, livre de poluentes, é constituída basicamente de uma mistura gasosa. Segundo Aires-Barros (1991), esta apresenta a seguinte composição química: nitrogênio - 75,5 %, oxigênio - 23,15 %, argônio - 1,28 %, dióxido de carbono - 0,016 %, neônio - 0,00125 %, kriptônio - 0,00029 %, hélio - 0,000072 %, xenônio - 0,000036 %, hidrogênio - 0,000003 %, ozônio - 0,000002 % e vapor de água que se apresenta com percentual variado.

Modificações ocorrentes na composição química da atmosfera de nosso planeta não correspondem a processos recentes. A própria natureza se encarregou, por milhares de anos, de participar ativamente deste processo através de lançamento de gases e particulados provenientes de atividades vulcânicas, tempestades, e da própria ação de organismos vivos. No entanto, as atividades antrópicas, de longe, são as principais responsáveis pela acentuação destas alterações. Segundo Branco (1995), as primeiras ações antrópicas que primordiam os impactos ambientais são contabilizadas com a descoberta do fogo. Embora estas tenham tido um impacto mínimo durante muitos séculos sobre a composição química da atmosfera de nosso planeta. A queima de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural introduz em nossa atmosfera uma grande gama de novos compostos que alteram o equilíbrio químico da fase gasosa do planeta provocando modificações significativas no meio ambiente, nos animais, plantas e no próprio homem e em suas edificações.

Dois mecanismos principais capazes de emitir poluentes na atmosfera estão presentes. O primeiro ocorre através de processos naturais e o outro a partir da atividade antrópica que é, de longe, o principal responsável pela contaminação atmosférica. Nas emissões desencadeadas por processos naturais encontram-se os fenômenos de emissão de COV<sub>s</sub> (compostos orgânicos voláteis) pelos vegetais presentes nas florestas, as erupções vulcânicas, fonte de H<sub>2</sub>S e SO<sub>2</sub>, e a presença de NO<sub>2</sub> advinda da oxidação do material vegetal que contém nitrogênio, além dos incêndios florestais. As emissões de poluentes para atmosfera, provocadas pela ação do homem, são a queima de combustíveis fósseis e o crescimento industrial.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Dentre os agentes poluentes que mais tem desencadeado agressões ao meio ambiente, ao homem e aos materiais rochosos que constituem suas edificações, destacam-se os gases CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, e NO e NO<sub>2</sub>, compostos orgânicos voláteis (COV<sub>s</sub>), ozônio produzido pelo “smog” fotoquímico, além de aerossóis contendo H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>, NaCl, HNO<sub>3</sub>, HCl, ácidos orgânicos, e material particulado sólido. Uma das preocupações nos dias atuais, nos grandes centros urbanos, onde a presença destes poluentes é significativamente alta, relaciona-se com a ação destes sobre os materiais pétreos que constituem os monumentos e edificações; e de como os processos de decaimento do material pétreo se acentua pela presença destes poluentes. Silicatos, em particular os feldspatos, apresentam-se susceptíveis a ação destes agentes modificando-se, dando assim origem aos argilominerais. Este artigo trata da ação dos principais agentes poluidores CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, e NO e NO<sub>2</sub> (NO<sub>x</sub>) sobre os materiais pétreos.

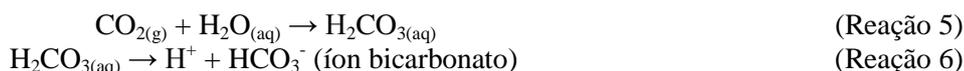
### 2.1. O Gás CO<sub>2</sub>

O monóxido de carbono, um gás inodoro e incolor, origina-se a partir de reações de oxidação incompleta de compostos orgânicos, que podem se dar a partir de processos naturais (vulcanismo, atividades biológicas), ou por atividade antrópica (combustão incompleta de combustível fóssil). De longe a ação antrópica é a mais contundente, devido à grande concentração de monóxido de carbono lançada na atmosfera a partir da combustão incompleta de combustível fóssil, sendo esta alta concentração de CO resultante do mau funcionamento e baixo rendimento dos aparelhos de combustão desenvolvidos pelo homem. Segundo Baird (2002), este gás será gradativamente oxidado no ar a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) através de mecanismo complexo que envolve a sua reação com os radicais OH<sup>•</sup> e não por sua oxidação direta com o oxigênio diatômico. Portanto a sua oxidação envolve a disponibilidade de radicais livres OH<sup>•</sup> que se originam a partir da decomposição fotoquímica de quantidades traços de ozônio (Reação 1) que produzem átomos de

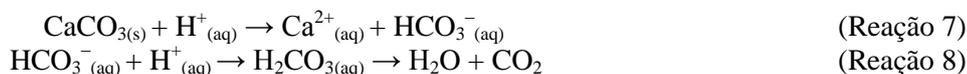
oxigênio no estado excitado. Estes por sua vez reagem com o vapor de água gerando os radicais livres  $\text{OH}^\bullet$  (Reação 2), que reagirão com o monóxido de carbono oxidando-o a  $\text{CO}_2$ , (Reações 3 e 4) conforme mecanismo abaixo:



Entretanto, a principal ação deste poluente sobre os materiais pétreos está associada a sua capacidade de gerar  $\text{CO}_2$ , que se combina com a água e através de processo de deposição úmida, é transferido para a superfície terrestre. O  $\text{CO}_2$  reage com a água tanto dos aerossóis quanto com a água meteórica formando ácido carbônico que rapidamente se ioniza liberando  $\text{H}^+$  e íon bicarbonato conforme mecanismo abaixo:

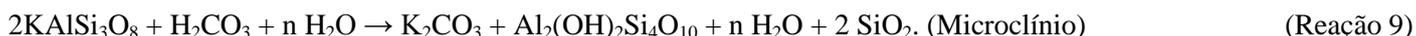


Devido a esta fonte de acidez, o pH destas soluções é inferior a 7,0, e portanto se localiza em região ácida. No caso das águas meteóricas, o pH da chuva “natural”, não poluída, é de aproximadamente 5,6. De forma que, apenas a chuva que apresenta pH inferior a 5,0 é considerada chuva ácida, Baird (2002). Esta diminuição de pH, aquém da faixa de 5,6, apresentado pelas águas, deve-se a traços de ácidos fortes que podem ser lançados na atmosfera tanto por processos naturais (vulcanismo, incêndios florestais, decomposição natural de vegetais, e outros), como por ação antrópica. As erupções vulcânicas podem liberar na atmosfera quantidades apreciáveis de poluentes que geram ácidos fortes como  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e provocam assim chuvas ácidas temporárias. A ação antrópica, ao contrário destes eventos esporádicos, libera continuamente quantidades apreciáveis de poluentes como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  de forma que os ácidos derivados destes poluentes são formados durante o transporte da massa de ar que os contem. Baird (2002) ainda assinala que as áreas mais afetadas pela ação das chuvas ácidas são constituídas de granitos e quartzo, uma vez que nestas regiões o solo tem menor capacidade de neutralizar esta acidez. Porém se as rochas são calcárias, o ácido pode ser neutralizado de maneira eficiente devido ao conteúdo de carbonato de cálcio presente no corpo rochoso que reage com a acidez conforme mecanismo abaixo:

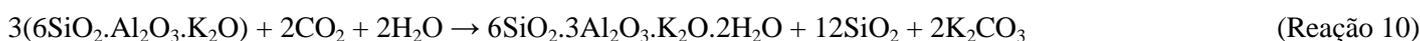


As reações acima apresentam alto rendimento, devido ao excesso de  $\text{H}^+_{(\text{aq})}$ , e, deste modo, corpos rochosos podem ser dissolvidos produzindo  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$ . Estas reações são responsáveis pela deterioração de monumentos, estátuas, e adornos confeccionados em rochas calcárias e mármore. Nas estátuas, os detalhes finos como mãos, orelhas, dedos, nariz são parcialmente ou totalmente perdidos pela ação das chuvas ácidas. A ação das águas acidificadas pela dissolução de gases poluentes como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , e  $\text{NO}$  e  $\text{NO}_2$  sobre os granitos, provocam alteração dos feldspatos e feldspatóides presentes no corpo rochoso, levando à sua caulinição.

Quando a água meteórica dissolve em seu interior gases como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  e  $\text{NO}_2$ , provenientes da atmosfera, promovendo a formação de ácidos carbônico, sulfúrico e nítrico respectivamente, que podem atuar sobre os minerais presentes no material rochoso promovendo sua alteração. Abaixo se observa uma reação desencadeada pela ação do ácido carbônico sobre o mineral microclínio (feldspato) gerando argilomineral:



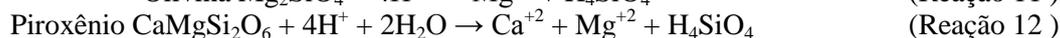
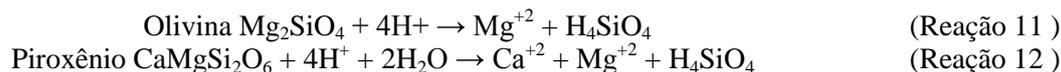
Ou de modo mais detalhado como abaixo:



Esse processo denominado de caulinição afeta os feldspatos das rochas graníticas gerando um produto baço, pulverulento, brando, desagradável. Segundo Frazão e Paraguassu (1998), esse processo de alteração intempérica é observado nas rochas graníticas, onde a ação dos ácidos sobre os feldspatos promove a caulinição dos mesmos e por consequência a desagregação do material rochoso em material areno-argiloso. Os feldspatos são minerais essenciais

presentes nos “granitos” e resultam da associação de dois ou três silicatos, um silicato de alumínio que se encontra associado a outro silicato alcalino ou alcalino-terroso. De forma que as águas meteóricas promovem a hidratação dos feldspatos. Os silicatos anidros de alumínio e do metal alcalino se hidratam e se separam. As águas meteóricas contendo em geral gases dissolvidos como CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, produzirão ácidos que então reagem com os feldspatos promovendo a sua caulinição.

Assim, diversas alterações podem ser observadas nos corpos rochosos devido à ação de águas acidificadas. Estas águas acidificadas pela promovem reações de hidrólise, uma substituição dos cátions da estrutura do mineral pelos íons de hidrogênio, de modo que esta reação de substituição iônica pode resultar na formação de novos e diferentes minerais ou pode levar a total desintegração do mineral original como se pode observar no caso de olivinas e piroxênios conforme a reação abaixo (Reação 11 e 12), nestes casos diz-se que a hidrólise foi total:



Ou como no caso dos feldspatos que sofrem caulinição conforme descrito anteriormente.

As reações de hidrólise são fortemente influenciadas pelo clima devido à variação da concentração de água disponível, e da temperatura. Desta forma, nas regiões tropicais úmidas, os materiais pétreos estão mais susceptíveis aos fenômenos de alitização, bauxitização e ferralitização, de modo que a sílica e as bases são removidas, concentram-se a alumina e os óxidos de ferro. Nas regiões subúmidas ocorre uma maior susceptibilidade a monossilificação com remoção das bases e parte da sílica, formando-se a caulinita. Nas regiões temperadas, estépicas e subáridas há a predominância da bissialização e em parte arenização do material rochoso. Nessas regiões, a fraca remoção da sílica e retenção parcial dos cátions básicos como K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup>.

Outras alterações no material pétreo podem ser observadas devido a presença desses poluentes, como no caso do oligoclásio, mineral silicatado da família dos feldspatos cálcio-alcalinos, e a nefelina, também um mineral silicatado do tipo feldspatóide, são sensíveis a ácidos notadamente o HCl. Os minerais máficos (escuros) são mais alteráveis por oxidação que os minerais félsicos (claros), salientando-se que o hiperstênio, mineral máfico da família dos piroxênios e constituinte dos charnockitos (granitos verdes tipo Ubatuba), degrada-se por insolação e modifica o padrão cromático da rocha. As reações tanto decorrentes de oxidação como de ataque ácido podem ocorrer simultaneamente aumentando ainda mais a capacidade de alteração do material pétreo.

Os sulfetos, minerais metálicos que ocorrem como acessórios, tanto em mármore quanto em granitos, serpentinitos e quartzitos, não só se oxidam, mais ou menos rapidamente, quando expostos às condições atmosféricas, mas também reagem com ácidos que promovem sua dissolução e conseqüente acidificação do meio pela formação de H<sub>2</sub>S. Deste modo, constitui-se em um dos principais problemas das rochas de revestimento. As emissões de NO<sub>x</sub> e SO<sub>2</sub> também são responsáveis direta ou indiretamente pela maior parte de outros poluentes secundários, gerados a partir de reações, onde estes gases estão envolvidos.

## 2.2.O Gás SO<sub>2</sub>

O SO<sub>2</sub>, um gás incolor de odor picante e irritante, com o dobro da densidade do ar, pode se depositar tanto por processo de deposição líquida como sólida. Se combinado com a água meteórica e dissolvido nesta, produz ácido sulfúrico, provocando chuva ácida. Aires-barros (2001), Baird (2002), Dionísio *et al.* (2004) assinalam que a oxidação do SO<sub>2</sub> na atmosfera a ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) pode se dar através de dois mecanismos distintos, um em fase gasosa e outro em fase aquosa. O mecanismo em fase gasosa se desenvolve em dias de céu limpo e com nuvens ocupando pequena percentagem de volume troposférico, enquanto a oxidação em fase aquosa se dá devido à solubilidade do gás SO<sub>2</sub> na água. Esta oxidação em fase gasosa apresentaria o possível mecanismo abaixo:



Ao passo que a oxidação em fase aquosa do  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_4^{2-}$  seria efetuada por quantidades traços de agentes oxidantes bem conhecidos como  $\text{H}_2\text{O}_2$ , e  $\text{O}_3$  presentes nas gotas transportadas no ar, onde  $\text{H}_2\text{O}_2$  e  $\text{O}_3$  seriam resultantes principalmente de reações induzidas pela luz solar no “smog” fotoquímico Baird (2002).

### 2.3. Os Gases NO e $\text{NO}_2$ ( $\text{NO}_x$ )

O  $\text{NO}_x$ , uma combinação de  $\text{NO}^*$  e  $\text{NO}_2$ , são espécies que se originam principalmente da queima de combustível fóssil nos motores de explosão e de algumas indústrias. Estes compostos são poluentes primários e fundamentais para a geração de  $\text{HNO}_3$  a partir do fenômeno denominado de “smog” fotoquímico. Esse fenômeno corresponde ao resultado de reações complexas que se desenvolvem, no nível da troposfera, entre os diversos compostos na maior parte gasosos. Essas reações levam a formação de produtos intermediários e produtos finais sendo todos extremamente danosos ao homem, plantas, animais, afetando também os materiais. Esse conjunto de reações envolve a participação dos compostos  $\text{NO}^*$  e  $\text{NO}_2$ , compostos orgânicos voláteis ( $\text{COV}_s$ ), e o gás oxigênio ( $\text{O}_2$ ). De forma simplificada, pode-se traduzir esse fenômeno pela equação:  $\text{COV}_s + \text{NO}_x + \text{O}_2 \rightarrow$  mistura de  $\text{O}_3$ ,  $\text{HNO}_3$  e compostos orgânicos parcialmente oxidados. No entanto, esse processo é bem mais complexo e envolve ainda a participação de particulados em suspensão, da luz, e de temperaturas moderadamente elevadas, além de exigir pouco movimento das massas gasosas de forma a garantir as condições adequadas para as reações se processarem.

O ácido nítrico formado por este processo tem como característica principal ser um ácido forte e também oxidante. O processo de formação não se dá pela oxidação direta do  $\text{NO}^*$  pelo oxigênio do ar, mas sim por reação com radicais Hidroxila ( $\text{HO}^*$ ), produzidos a partir da reação do produto de decomposição do ozônio com a água (conforme Reação 20 e 21), ou mesmo pela decomposição do peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) (Reação 22), presente no “smog” fotoquímico conforme as reações abaixo:



Sendo o radical hidroxila o principal agente na remoção química, por oxidação, da maior parte dos gases menores da troposfera, estabilizando sua composição e evitando acúmulo de muitas espécies que podem interferir na estabilidade da camada de ozônio da estratosfera, Aires-Barros (1991, 2001).

O ácido nítrico formado no “smog” fotoquímico, apresenta uma taxa de deposição que é relativamente independente da umidade do ar, o que o torna especialmente importante em climas secos e quentes, Dionísio *et al.* (2004).

O decaimento promovido pelos óxidos de nitrogênio, notadamente  $\text{NO}^*$  e  $\text{NO}_2$ , torna-se difícil de ser observável, uma vez que, os produtos formados apresentam elevada solubilidade em água (341g/100g de água a 25°C). Diversos autores como Aires-Barros (2001), Dionísio *et al.* (2004), Baird (2002), assinalam a possibilidade de vários mecanismos de decaimento para o ataque destas espécies ao material pétreo. Um destes seria através da deposição a seco do  $\text{NO}_2$  com posterior adsorção deste à superfície do material pétreo, conforme a equação:



Outro mecanismo se tornaria possível quando concentrações elevadas de ozônio ( $\text{O}_3$ ) e  $\text{NO}_2$  estivessem presentes. Nesse caso ter-se-ia a formação do pentóxido de nitrogênio ( $\text{N}_2\text{O}_5$ ) que reagiria com água formando ácido nítrico através do seguinte mecanismo:



O  $\text{N}_2\text{O}_{5(\text{ads})}$  formado apresenta a possibilidade de dois mecanismos de ação. No primeiro, o  $\text{N}_2\text{O}_5$  combina-se com a umidade do ar gerando ácido nítrico conforme a reação abaixo:



Outro mecanismo se daria por adsorção a seco ou a úmido, à superfície do material pétreo. A seco, o  $N_2O_5$  combina-se com o  $SO_2$  gasoso e com a água gerando assim ácido sulfúrico e  $NO_2$  conforme a reação:



No mecanismo de adsorção a úmido, o  $HNO_{3(ads)}$  combina-se com a água da umidade do ar gerando ácido nítrico líquido conforme reação:



Nos monumentos situados próximos à região litorânea, notadamente aqueles próximos ao mar, deve-se considerada a ação do íon cloro que provem fundamentalmente da névoa salina e aerossóis transportados pelo vento e que é rica em sais marinhos notadamente  $NaCl$ . O ácido clorídrico pode ser gerado a partir de reação do cloreto de sódio marinho com ácido sulfúrico obtido da oxidação do  $SO_2$  segundo a reação:



Esse fato está diretamente associado à ocorrência do mineral thenardita ( $Na_2SO_4$ ), presente nas eflorescências salinas dos monumentos e edificações construídos nesta região próxima ao mar. Nos monumentos em pedra calcária, edificados em regiões litorâneas, nota-se a presença, nestas eflorescências, do mineral antarcticita ( $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ ) que se gera de acordo com a reação abaixo, Aires Barros (1991):



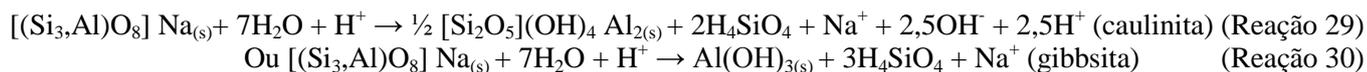
Portanto, a ação destes poluentes atmosféricos e de alguns dos seus produtos formados, atua diretamente sobre o material pétreo provocando decaimento da rocha. Nos materiais rochosos constituídos por pedra calcária, ocorre o fenômeno de sulfatação, com formação em geral, de gipsita, que se deposita na superfície do material pétreo. Segundo autores como Aires-Barros (1991, 2001), Dionísio *et al.* (2004) a equação que traduz a reação de sulfatação dos calcários promovida pelas águas pluviais pode ser escrita como abaixo:



Embora, o mecanismo de ação de transformação de rocha são em  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  ainda não esteja totalmente esclarecido, pode-se perceber a presença fundamental de três processos distintos. No primeiro mecanismo ocorreria a deposição a úmido, que se daria por oxidação heterogênea do  $SO_2$  na fase aquosa na atmosfera, ou sobre a superfície das rochas. O segundo mecanismo ocorreria por oxidação homogênea do  $SO_2$  em aerossol de sulfato, realizada na troposfera, e o terceiro mecanismo corresponde ao processo de deposição a seco do  $SO_2$ , Aires-Barros (1991).

Segundo Aires-Barros (1991, 2001), Baird (2002), nas atmosferas poluídas o nevoeiro fotoquímico supõe oxidação atmosférica dos  $COV_s$ , gerando espécies fotoquímicas que desempenham papel importante na oxidação do  $SO_2$ , conforme descrito anteriormente. Nestes casos a oxidação homogênea do  $SO_2$  é significativa. Em um primeiro estágio a oxidação do  $SO_2$  nas atmosferas urbanas contaminadas gera partículas sulfatadas que podem se dissolver nas gotículas de vapor de água e serem depositadas na superfície dos monumentos. Em segunda fase, o nevoeiro sulfatado com gotículas de ácido sulfúrico, atuará sobre a superfície das pedras calcárias, dando origem a crosta gipsífera mais ou menos desenvolvida, Aires-Barros (1991), Dionísio *et al.* (2004).

Com relação às rochas quartzofeldspáticas, granito-gnaissóides, o principal fenômeno de decaimento observado pela ação destes poluentes é a arenização com concomitante enfraquecimento das ligações físicas. Esse fenômeno permite a ocorrência de processos de esfoliação e escamação, além de modificações químicas importantes como argilização dos feldspatos e cloritização dos minerais ferromagnesianos, em especial as biotitas. A presença desses ácidos provoca diminuição do pH da água pela presença de íons  $H^+$ , acelerando assim as reações de hidrólise e oxido-redução. O processo de meteorização dos aluminossilicatos presentes nesses materiais pétreos supõe normalmente dissoluções acompanhadas de formação de precipitados de modo que a dissolução de feldspatos é acompanhada de precipitação de caulinita ou de hidróxido de alumínio  $Al(OH)_3$  conforme as reações abaixo:



### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As rochas são um dos materiais mais utilizados pelo homem desde tempos remotos tanto pelo seu padrão de beleza como pela resistência e durabilidade. No entanto as modificações climáticas, desencadeadas por ação antrópica, vem provocando severas alterações na durabilidade e resistência destes materiais, tornando-os mais susceptíveis à desagregação.

Os materiais pétreos têm estado sob ação constante das modificações da atmosfera do Planeta e, como sistemas químicos que são, tem reagido a estas através de processos que geram o decaimento da rocha. Esses processos de decaimento, embora natural, e de baixa velocidade, tem apresentado significativo aumento na velocidade de suas reações pela presença de gases poluentes como CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO e NO<sub>2</sub>, compostos orgânicos voláteis (COV<sub>s</sub>), ozônio e aerossóis, material particulado sólido, e pelo aumento de temperatura provocado pelo efeito estufa. Envolvendo uma série de reações como dissolução, hidrólise, oxido-redução que se desencadeiam no material pétreo culminando com alteração da composição química e mineralógica que, por conseguinte, alteram as propriedades e características do material rochoso, promovendo seu decaimento. Cada poluente tem desempenhado importante papel neste processo de alterabilidade, destacando-se entre estes o CO<sub>2</sub> que além de ter papel na acidificação das águas, também eleva a temperatura e favorece a velocidade de algumas reações químicas.

Dentre as reações desencadeadas pela ação desses poluentes sobre o material rochoso destacam-se aquelas onde minerais são parcial ou totalmente consumidos, como no caso de dissolução total por águas ácidas dos anfibólios e piroxênios, assim como os processos de arenização sofridos pelas rochas quartzo-feldspáticas, granito-gnaissóides, de sulfatação em rochas carbonáticas, e de caulínização, sofrido pelos feldspatos e feldspatóides, assim como da cloritização dos minerais ferromagnesianos, em especial as biotitas.

A compreensão da ação destes agentes poluentes e de seus mecanismos de ação que atuam sobre os materiais pétreos, objetiva prevenir com antecedência, a ocorrência de futuras patologias das rochas tão largamente empregadas nas edificações e monumentos de nossa cultura.

### 4. REFERÊNCIAS

- Aires-Barros, L. 1991. Alteração e Alterabilidade das Rochas, Lisboa, INIC, 384p.
- Aires-Barros, L. 2001. As Rochas dos Monumentos Portugueses. Tipologia e Patologias. Volume 1. Lisboa. Instituto Português do Patrimônio Arquitetônico. 590p.
- Baird, C. 2005. Química ambiental. 2ª ed.
- Branco, S.M. 1995. Poluição do Ar. 1ª edição. Editora Moderna. São Paulo, SP. ISBN 85-16-01213-1.
- Dionísio, A.; Aires-Barros, L.; Basto, M.J. 2004. A Degradação das Rochas do Patrimônio Cultural Construído: O Caso das Rochas Carbonatadas, Boletim da Sociedade Portuguesa de Química, volume 93, p. 61-68.
- Frazão, E.B.; Paraguassu, A.B. 1998. Materiais Rochosos para a Construção. In: Oliveira, Antônio Manuel dos Santos, Brito, Sergio Nertan Alves de (Organizadores). Geologia de Engenharia. São Paulo, SP. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, p.331-342.
- Petrucchi, E.G.R. 1998. Materiais de Construção. 11 edição. Editora Globo, São Paulo, SP, 435p.
- Freire, L.C. 2009. Utilização de Resíduos Oriundos do Desdobramento de Rochas Ornamentais para a Confecção de Blocos Paisagísticos. Iniciação Científica, Engenharia de Petróleo e Gás, UNES.

- Gonçalves, J.P. 2000. Utilização do Resíduo de Corte de Granito (RCG) como Adição para a Produção de Concretos, 2000. 135p. Tese. NORIE/UFRGS. Porto Alegre, RS. Disponível em <http://www.infohab.org.br>. Acessado em 20/12/2010.
- Mercado, M.C. 1990. Solo-cimento: Alguns Aspectos Referentes a sua Produção e Utilização em Estudo de Caso. Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo, São Paulo, S.P.
- Moura, W.A; Leite, M.B. 2011. Estudo da Viabilidade da Produção de Blocos com Utilização de Resíduo de Serragem de Rochas Ornamentais para Alvenaria de Vedação. Revista Escolar de Minas, Ouro Preto, MG, v. 64, n. 2, p.147-154.
- Pedrosa, S.C. 2000. Curso de Serrador. Cachoeiro de Itapemirim-ES. CETEMAG - Outubro.
- Ribeiro, R.C.C; Correia, J.C.G; Seidl, P.R; Almeida, S.L.M; Carvalho, E.A. 2007. Utilização de Rejeitos de Rochas Ornamentais em Misturas Asfálticas. Série Tecnologia Mineral – RJ, CETEM/MCT.
- Silva, A.C. 1998. Caracterização dos Resíduos de Serragem de Blocos de Granito: Estudo Potencial de Aplicação na Fabricação de Argamassas de Assentamento e de Tijolos Solo-cimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, ES.
- Sousa, A.A.P. e Rodrigues, R. 2002. Consumo dos Principais Insumos no Desdobramento de Granitos do Nordeste, de Diferente Grau de Dureza. In: III Simpósio de Rochas Ornamentais. Recife, PE. Anais. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia. p.171-178.
- Souza, J.N.; Rodrigues, J.K.G.; Neto, P.N.S. 2010. Utilização dos Resíduos Provenientes da Serragem de Rochas Graníticas como Material de Enchimento em Concretos Asfáltos Usinados a Quente. Disponível: [http://www.sfiac.org.br/iel/bolsaderesiduos/Artigos/Artigo\\_Residuos\\_de\\_Serragem\\_de\\_rochas.pdf](http://www.sfiac.org.br/iel/bolsaderesiduos/Artigos/Artigo_Residuos_de_Serragem_de_rochas.pdf). Acesso em: 12 de novembro 2010.
- Vieira, C.M.F; Peçanha, L.A; Monteiro, S.N. 2003. Efeito da Incorporação de Resíduo da Serragem de Granito em Massa de Cerâmica Vermelha. Vértices, Rio de Janeiro, RJ, v. 5, n. 3, p.144-157.
- Vieira Jr, H.T. 2011. Proposta de Recuperação de Granalha não Ativada no Desdobramento de Rochas Ornamentais em Teares Multilâminas. 67 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, UFRGS, Porto Alegre, RS.