

ESPECIFICACIONES DE USO DE ROCAS ORNAMENTALES CON BASE EN ENSAYOS DE ALTERACIÓN ACELERADA

(Use Specifications of Ornamental Rocks
Based in Accelerated Ageing Tests)

Javier Eduardo Becerra Becerra*, Antônio Gilberto Costa**

Instituto de Geociencias*, Universidad Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte, Brasil, javierbecerra2011@yahoo.com *LABTEC-Rochas*, CPMTC. (UFMG), agcosta@lcc.netuno.ufmg.br

(Recibido Marzo 15 de 2007 y Noviembre 16 de 2007)

| | |
|---|--|
| <p>Resumen:</p> <p>Las rocas ornamentales experimentan procesos de deterioro ocasionados por la contaminación atmosférica y por la acción de algunas sustancias industriales usadas para su instalación, limpieza y conservación, presentando problemas como pérdida de brillo y color, cambios en su porosidad y absorción y reducción de su resistencia mecánica. Los ensayos de alteración acelerada y de caracterización tecnológica, realizados a partir de muestreo sistemático tanto en los trabajos de exploración como en procesos de desarrollo de mina y fabricación de productos, permiten conocer anticipadamente las características de las rocas en relación con la acción del medio ambiente, ayudando a prever la existencia de problemas que pueden afectar el uso de determinada litología como roca ornamental y por consiguiente sus posibilidades de comercialización. Seis variedades de granitos ornamentales brasileños, fueron sometidas a ensayos de ataque químico, lixiviación estática, exposición a vapores de ácido sulfuroso y cristalización de sales para simular algunos agentes físicos y químicos que causan deterioro en rocas aplicadas en revestimientos internos y externos. El grado de microfracturación y la constitución mineralógica fueron considerados como los factores determinantes de la alterabilidad. Variación en factores como porosidad y absorción de agua después de los ensayos de alteración acelerada, permitieron determinar los materiales más susceptibles a procesos de alteración.</p> | <p>Abstract:</p> <p>Dimension stone present deterioration process caused by air pollution and some industrial substances used for application and maintenance. Loss of brilliance, alterations of original color, changes in the porosity and absorption characteristics and reduction of mechanical resistance are the most important process in the ornamental rocks. The alterability tests and technological characterization, carried out on base of a systematic sampling in the exploration and mining activities, permit the anticipate knowledge of the rock behaviors against environmental conditions, predicting problems that may affect the potential use and trade possibilities of some types of rocks such dimension stones. Six types of Brazilian granites were submitted to different test such static lixiviation, exposition to sulphurous acid and salt crystallization to simulate the main chemical and physical agents of deterioration in rocks applied in external and internal revetment. The degree of microfracturing and the mineralogical constitution are the most important factors of the alterability. A control of porosity and water absorption parameters showed some differences between the different types of granites tested, establishing differences related to the susceptibility to weathering process.</p> |
| <p>Palabras clave: Rocas ornamentales, Alterabilidad, Caracterización, Uso.</p> | <p>Key words: Dimension Stones, Alterability Tests, Characterization, Use.</p> |

1. INTRODUCCIÓN

Las rocas ornamentales (granitos, mármoles, calizas y otras), son materiales nobles empleados para la construcción de fachadas, pisos, paredes y apliques decorativos que dan valor agregado a las obras donde se utilizan. Se caracterizan por su duración y gran resistencia a los efectos adversos del medio ambiente. Sin embargo, al ser usados en ambientes externos, experimentan con mayor intensidad varios procesos de deterioro, que pueden generar desde la pérdida de brillo y alteración del color original, afectando su calidad estética, hasta procesos de alteración más graves como

exfoliación, fracturas, disolución mineral y otros que conllevan a la reducción de resistencia mecánica, comprometiendo su durabilidad y ocasionando grandes pérdidas a constructores, productores y comerciantes de este tipo de materiales.

La posibilidad de usar un material pétreo como roca ornamental, depende de factores intrínsecos de la roca, tales como la intensidad y el tipo de alteración mineralógica presente, la existencia de tensiones confinadas, la heterogeneidad textural y sus propiedades físicas y químicas. También son importantes los factores externos, relacionados con los procesos de extracción y beneficio, como los defectos resultantes en los procesos

de corte, pulimento y brillo, los cuales pueden generar aparición o incremento del grado de microfisuras existente. (Aires-Barros, 2001).

Los macizos graníticos, al igual que otros yacimientos de materiales ornamentales de origen sedimentario o metamórfico pueden presentar variaciones texturales y composicionales aún en distancias muy cortas. Por esto es importante que en los trabajos de exploración y desarrollo de mina de rocas ornamentales, se realice un muestreo sistemático y representativo, con el fin de realizar ensayos de alteración acelerada, también conocidos como ensayos de alterabilidad, y ensayos de caracterización tecnológica. Este conjunto de pruebas, acompañado de una adecuada interpretación, ayuda a determinar los sectores de un yacimiento que presentan los mejores materiales para el desarrollo de mina, así como a seleccionarlos adecuadamente en relación al uso más conveniente, reduciendo de esta forma las pérdidas de material por uso inadecuado.

En las normas internacionales (López, 2002), se considera fundamental la realización de ensayos de absorción, determinación de peso específico, resistencia a esfuerzos flexores, resistencia al congelamiento y deshielo, resistencia al impacto de cuerpo duro, determinación del coeficiente de absorción por capilaridad, resistencia al anclaje y ensayos de alterabilidad, en rocas usadas como revestimiento de fachadas externas, fachadas internas y pisos.

La alterabilidad, definida como “La susceptibilidad de la roca a alterarse en función del tiempo” (Aires Barros, 2001), se determina a través de los ensayos de alteración acelerada, algunos de los cuales son los siguientes: exposición a vapores de ácido sulfuroso, lixiviación estática, lixiviación dinámica (uso de extractor soxhlet) y ensayos de oxidabilidad. Este conjunto de ensayos simula los principales factores físicos y químicos, que causan deterioro en rocas con aplicación ornamental, entre ellos la acción de sustancias químicas de uso doméstico e industrial, la exposición a ambientes oxidantes (litorales) y las condiciones adversas del medio ambiente (lluvia ácida) en áreas urbanas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El muestreo de los materiales para evaluación de la alterabilidad se hizo en marmolerías que realizan los procesos de transformación y beneficio de los materiales. Debido a que los materiales analizados proceden de diversos estados a lo largo y ancho del país, no fue viable la realización de muestreo en afloramientos naturales. Los ensayos de alteración acelerada fueron realizados en el laboratorio de tecnología de rocas LABTECROCHAS del Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa CPMTC, dependencia del Instituto de Geociencias (IGC) de la Universidad Federal de Minas Gerais UFMG. Fueron seleccionadas seis variedades de granitos brasileños de amplia aceptación en el mercado, conocidos con los nombres comerciales de Granito Preto São Gabriel, Granito Verde Pavão, Granito Branco Cotton White, Granito Amarelo Ouro Brasil, Granito rojo “Vermelho Capão Bonito” y Granito Cinza Prata Imperial.

Antes de la realización de los ensayos de alteración acelerada, secciones delgadas de cada uno de los litotipos analizados fueron observadas en el microscopio petrográfico, siguiendo las directrices de la norma EN 12407. Se hizo una evaluación cualitativa y cuantitativa de las características petrográficas relacionadas con La alterabilidad determinando: composición mineralógica (**Me**: minerales esenciales, **Mac**: minerales accesorios, **Ma**: minerales de alteración), textura, grado o intensidad de microfisuramiento intergranular (**It**) e intragranular (**Ig**), la porosidad y la naturaleza de los contactos intergranulares (planos, cóncavo-convexos, aserrados, etc.). Todas estas son características que permiten evaluar preliminarmente la alterabilidad de las rocas cuando son usadas en diferentes situaciones que generan procesos de deterioro (Artur et al., 2001). De las seis variedades de roca analizadas, cinco son rocas ígneas plutónicas y una es roca metamórfica (granito Amarelo Ouro Brasil). Todas son rocas inequigranulares, de colores diferentes, con granulometría variable entre media y gruesa y de diferente composición mineralógica (ver tabla 1).

Ensayos de alteración acelerada: el conjunto de rocas seleccionado fue sometido a ensayos de alteración acelerada, siguiendo una secuencia apropiada que permitiera simular las principales condiciones a las que se encuentran expuestas una vez instaladas en obras como fachadas, pisos y ornamentos.

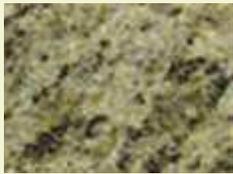
Los ensayos se realizaron de acuerdo con la aplicación de normas europeas (EN) y normas brasileñas (ABNT). Algunos ensayos no normalizados fueron realizados siguiendo métodos utilizados por entidades de investigación como el “Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT)”, la Universidad Nueva de Lisboa (Portugal) y el Laboratorio Oficial para Ensayos de Materiales de la Construcción (LOEMCO) de España.

Los ensayos se hicieron exponiendo tanto la superficie pulida de la roca, como la superficie no pulida (roca en bruto), a las sustancias representativas de los agentes que deterioran en mayor o menor grado los diversos tipos de rocas ornamentales, usando para cada litología diez cuerpos de prueba de 7 cm de lado y 2 cm de espesor.

La resistencia al ataque químico por sustancias industriales usadas para la limpieza de granitos ornamentales fue evaluada a través de La exposición de La superficie pulida de las rocas a los siguientes productos químicos: hidróxido de amonio, hipoclorito de sodio, ácido clorhídrico, ácido cítrico e hidróxido de potasio; estos productos son recomendados en el anexo H de la norma NBR 13818 de la Asociación Brasileña de Normas técnicas -ABNT-, para testar la alterabilidad de baldosas cerámicas.

Para este ensayo se utilizaron baldosas de 30 x 20 cm x 2 cm de espesor. Antes del ensayo se evaluó el brillo de cada baldosa para ver sus cambios después del ensayo. Luego se colocaron anillos de PVC de 6,5cm de diámetro interno, pegados con silicona. Después de comprobar el secado y la impermeabilización del pegante, la superficie pulida de cada baldosa fue sometida a la acción de los productos químicos dentro de los

Tabla 1. Características petrográficas de las rocas sometidas a ensayos de alteración acelerada. Baldosas de 7x7x2cm.

| Nombre Comercial | Foto | Tipo de roca – Composición mineralógica | Microfotografía. Aumento 25x |
|----------------------------------|---|---|---|
| Granito Amarelo Ouro Brasil |  | Gneis sienogranítico con granate. Me: K-feldespato microperítico (55%), plagioclasa oligoclasa (An 10-30) (15%), cuarzo (20%) e biotita (7%). Mac: granate (3%), Ma: caolinita y limonita. C: plano y cóncavo-convexo. It: alto. Ig: alto. |  |
| Granito vermelho Capão Bonito |  | Sienogranito. Me: K-feldespato microclina (45%), cuarzo (35%), biotita (10%) y plagioclasa (10%). Ma: Caolín, sericita y clorita. C: plano y aserrado. It: alto. Ig: medio. |  |
| Granito Preto São Gabriel |  | Diorita. Me: Plagioclasa andesina (An30-50) (50%), ortopiroxenos (hiperstena) (25%) y biotita (18%). Mac: Cuarzo (4%), hornblenda (3%) e apatito. Ma: sericita y óxidos de hierro. C: plano y cóncavo-convexo. It: bajo a medio. Ig: bajo em Pl, medio en Px. |  |
| Granito Cotton White |  | Albita granito. Me: Plagioclasa (58%), cuarzo (20%) y K-feldespato (20%). Mac: Muscovita. Ma: Caolinita como producto de alteración de feldespatos. C: plano y aserrado. It: no existente. Ig: bajo. |  |
| Granito Verde Pavão |  | Charnockita. Me: Plagioclasa andesina (An 30-50) (40%), K-feldespato perítico (25%), cuarzo (15%), ortopiroxeno (hiperstena 10%), granate (5%), biotita (5%). Mac: apatita. Ma: bastita (producto de alteración de piroxenos), clorita. C: plano. It: alto. Ig: alto. |  |
| Granito Cinza Prata Imperial |  | Monzogranito biotítico. Me: Plagioclasa oligoclasa (An10-30) (31,4%), microclina (25,6%), cuarzo (21,5%) y biotita (19,3%). Mac: titanita (1,8%) y opacos (0,4%). Ma: sericita, caolinita y clorita. C: plano y cóncavo-convexo. It: bajo. Ig: bajo. |  |

anillos. Las observaciones se limitaron a registrar las variaciones en apariencia, tonalidad y brillo.

La simulación del ataque a las rocas, producido por sustancias químicas presentes en la atmósfera urbana contaminada, se hizo a través del ensayo de lixiviación estática, denominada por el IPT “Ensayo de alterabilidad por inmersión en líquidos reactivos”, en el cual las muestras son inmersas en soluciones reactivas de HCl, H₂SO₄ y HNO₃ con concentración de 1% (m/m) diluidas hasta pH=3, durante un período de 20 días (Becerra-Becerra & Costa, 2003).

También fue realizado el ensayo de Resistencia al Envejecimiento por exposición al SO₂ (norma EN 13919), exponiendo las probetas a la acción de SO₂ en cámara cerrada. Estos ensayos fueron realizados con el objetivo fundamental de determinar el efecto que estas tres sustancias, presentes en la lluvia ácida y en ambientes litorales, tendrían sobre rocas usadas en ambientes externos, ya sea en fachadas, pisos, escaleras, etc.

La oxidabilidad fue determinada por medio del ensayo de Determinación de resistencia al envejecimiento por choque

Térmico (norma prEN 14066), sometiendo las probetas a ciclos sucesivos de calentamiento a 105 °C seguidos por inmersión inmediata en agua a 20 °C. La superficie de las probetas también fue expuesta a la acción de una solución concentrada de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) con concentración del 50% (Becerra-Becerra & Costa, 2005). Esta sustancia, además de ser fuertemente oxidante, permite diferenciar las rocas porosas de las no porosas, debido a la intensidad del ataque, que puede llegar a ser muy fuerte, ocasionando a veces la desintegración de la roca (Lombardero, 2001 in Calvo & Maya, 2001).

El ensayo de cristalización de sales (Norma EN12370) realizado en 15 ciclos de inmersión de las probetas de roca en solución de sulfato de sodio anhidro (concentración 14% m/m) por dos horas, alternados con secado en estufa a 105°C por dieciséis horas, permitió verificar el efecto de la cristalización de sales provenientes de diversas fuentes como las argamasas usadas en la instalación de piezas terminadas, el suelo y las sales originadas por procesos generados por la contaminación del medio ambiente. Una modificación del ensayo fue la inmersión parcial de las probetas colocando la base de las mismas en contacto con la solución de sulfato de sodio para observar la ascensión capilar de la solución salina.

Durante los ensayos se hizo el registro de las variaciones de masa de las probetas. Los cambios estéticos también fueron registrados, determinándose la formación de superficies manchadas, áreas con oxidación notoria, pérdida de brillo, etc. En aquellos granitos que presentaron mayor deterioro físico (cambio de tonalidades, pérdida de brillo, etc.), además de registrarse las variaciones de masa, se compararon los índices físicos antes y después de los ensayos, observando el comportamiento de parámetros como porosidad y absorción de agua, por efecto del deterioro de los materiales.

Al microscopio petrográfico fue posible determinar cambios a nivel de microfrazas, de la apariencia superficial de los minerales, contornos cristalinos, etc. Los líquidos residuales fueron analizados por plasma para la determinación de pérdidas de cationes en los minerales, las cuales ocasionan problemas de deterioro y mudanzas físicas en la roca. Para complementar el conjunto de análisis realizados, se utilizó el microscopio electrónico de barrido con microsonda acoplada (MEV-EDS) para la observación de cambios ocurridos en la superficie de los minerales, en microfrazas y poros, el efecto de la cristalización de sales en la estructura interna de la roca y la neoformación de minerales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan de modo resumido las observaciones registradas tanto en la superficie de las piezas, como las observaciones a nivel mineralógico después de los ensayos de alteración acelerada. La exposición de la superficie de todos los granitos a las soluciones utilizadas para evaluar la alterabilidad frente a sustancias químicas e industriales, generó mudanzas, resumidas en la tabla 2.

3.1 Cambios a nivel estético

En todas las variedades de granito analizadas se observan mudanzas estéticas, especialmente en los ensayos de lixiviación estática y exposición a vapores de ácido sulfuroso. Las más importantes son la generación de manchas, la pérdida de brillo y de color y el realce de algunas características como el microfracturamiento, especialmente en los granitos Verde Pavão y Preto São Gabriel (ver figura 1). Es de observar que la intensidad de los cambios estéticos puede ser tan grande que daña y reduce en gran medida la vida útil de los materiales al no conservar sus características esperadas de color, brillo y belleza. En el granito Verde Pavão, el color original verde oliva intenso cambia a una tonalidad verde clara, con formación de superficies blanquecinas en algunos sectores. Se observa también realce del microfracturamiento existente, generación de pequeñas cavidades y pérdida del brillo original, adquiriendo una apariencia opaca. El Granito Preto São Gabriel presenta pérdida relativa de brillo, siendo el cambio más significativo el de la tonalidad que pasa de negro intenso a gris intermedio, con desarrollo de manchas amarillentas alrededor de los cristales de biotita (Becerra Becerra, 2004).

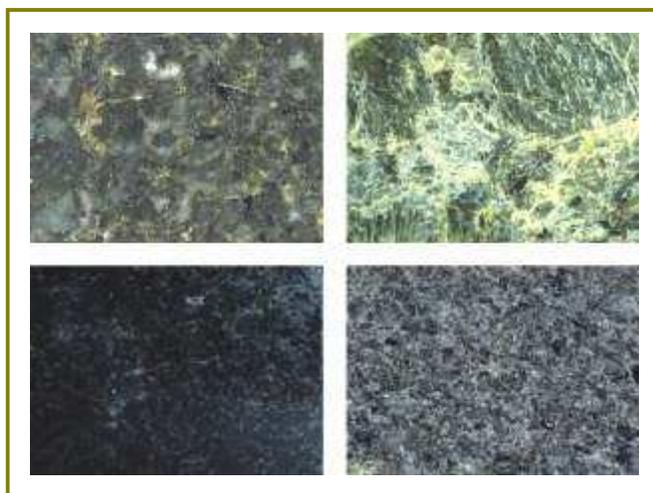


Figura 1. Cambios de tonalidad en los granitos Verde Pavão (superior) y Preto São Gabriel (inferior) después de la realización de los ensayos de alterabilidad. Probetas de 7x7x2cm. Izq: roca inalterada. Der: roca alterada.

En el granito Amarillo Ouro Brasil, durante los ensayos de oxidabilidad y lixiviación estática se forman manchas amarillentas de oxidación (ver figura 2), especialmente en los bordes de los cristales de granates (almandino), debidas a la oxidación y liberación de hierro constituyente de este mineral. El manchado es más acentuado cuando la sustancia utilizada para el ataque ácido es HCl (ver figura 3). Las demás áreas, correspondientes a los minerales de feldespatos, no experimentaron cambios significativos.

Tabla 2. Resultados del ataque químico por sustancias químicas presentes en productos industriales.

| Nombre Comercial | Clasificación Petrográfica | Producto químico / Alteración observada |
|------------------------------|----------------------------------|---|
| Granito Verde Pavão | Hiperstena Granito o Charnockita | Ácido clorhídrico: blanqueamiento acentuado de la región de contacto, remoción de clorita en las áreas de fractura. Corrosión y oxidación de biotita. Ácido cítrico: formación de capa oleosa que no es fácilmente removida; incipiente oxidación de cristales de biotita. Hipoclorito de sodio: formación de película cristalina, levemente oleosa; blanqueamiento de las áreas de contacto intermineral de las fisuras. Leve oxidación de biotita. |
| Granito Preto São Gabriel | Diorita | Ácido clorhídrico: blanqueamiento intenso del área de contacto. Oxidación de biotita, que toma tonalidades amarillas claras y blancas. Hipoclorito de sodio: formación de capa blanquecina en la superficie de exposición. Ácido cítrico: formación de capa oleosa superficial, pérdida de lustro. Áreas de incipiente blanqueamiento y oxidación de biotita. |
| Granito Cinza Prata Imperial | Monzogranito Biotítico | Ácido clorhídrico: intensa oxidación de biotita con desarrollo de áreas de color marrón recubriendo las áreas de estos minerales; manchado general de la superficie generando una película de color amarillenta. Ácido cítrico: capa oleosa en la superficie que no es removida por procesos de limpieza posteriores. Leve amarillamiento de la superficie con incipiente oxidación de las áreas con biotita. Hipoclorito de sodio: formación de una capa pulverulenta fácilmente removida; el área de contacto queda opaca, sin brillo. Hidróxido de amonio: pérdida incipiente de brillo en la superficie de contacto. |
| Granito Amarelo Ouro Brasil | Gneis Sienogranítico Con granate | Ácido clorhídrico: amarillamiento intenso de la superficie de contacto. Pérdida de brillo y manchado alrededor de los cristales de granate con evidencias de oxidación. Ácido cítrico e hipoclorito de sodio: amarillamiento intenso de la superficie de contacto. |
| Granito Branco Cotton White | Albita Granito | Ácido clorhídrico: sin alteración evidente. Ácido cítrico: formación de capa oleosa en la superficie; leve amarillamiento. Hipoclorito de sodio: cristalización en la superficie; leve pérdida de brillo en el área de contacto. Hidróxido de amonio: sin alteración evidente. |
| Granito Vermelho | Sienogranito | Ácido clorhídrico: corrosión y amarillamiento de las áreas con minerales ferromagnesianos; oxidación de biotita con generación de manchas de herrumbre. Hipoclorito de sodio: formación de capa pulverulenta por cristalización de hipoclorito en la superficie fácilmente removida; el área de contacto queda opaca, sin lustro. |

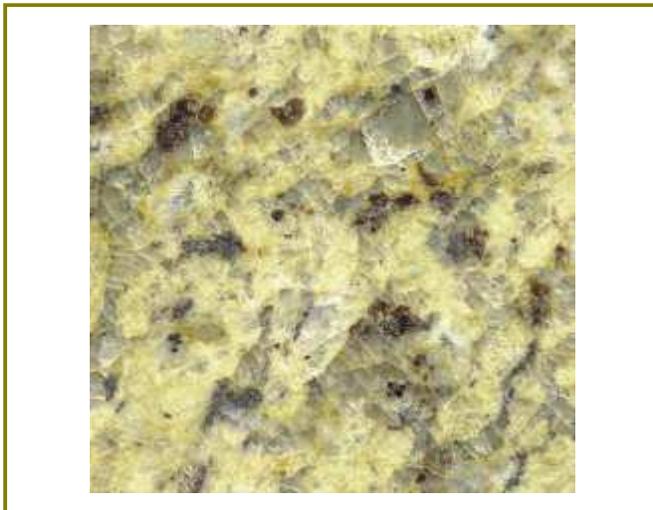


Figura 2. Oxidación de granates (manchas amarillentas) en el granito “Ouro Brasil” después de lixiviación estática (Sup). Elementos lixiviados (ppm) determinados por Espectrómetro de Plasma Inductivo AES. Probeta de 7x7x2cm (Inf).

El granito rojo “Vermelho Capão Bonito” presenta un leve cambio de tonalidad de color rojo original a un tono rosa oscuro sin perder el brillo original. Los granitos Cinza Prata Imperial y Cotton White no presentan cambios estéticos significativos.

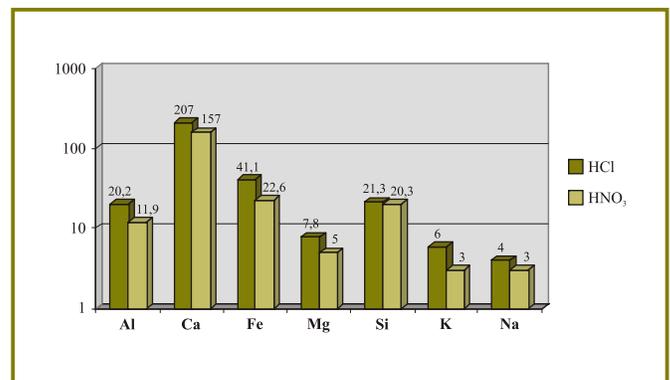


Figura 3. Minerales del Granito Amarelo Ouro Brasil lixiviados durante el tratamiento con soluciones ácidas de HCl y HNO₃.

3.2 Cambios en el microfracturamiento y apariencia de los minerales al microscopio

El análisis petrográfico ayudó a corroborar las observaciones hechas en las baldosas sometidas a los ensayos de alteración acelerada. La respuesta de los granitos frente al tratamiento con ácido fue similar para las diferentes soluciones, desarrollándose alteración progresiva de los minerales y crecimiento gradual de las microfracturas. El crecimiento y el desarrollo de nuevas microfisuras es muy notorio especialmente en los granitos Amarelo Ouro Brasil y Verde Pavão (Becerra-Becerra, 2004).

La alteración mineralógica se observa con gran intensidad en los granitos con plagioclasa con mayor contenido de calcio (An30-50), especialmente el granito Preto São Gabriel. En las láminas correspondientes a las probetas sometidas a los ensayos de alteración acelerada, los cristales de plagioclasa tienen una apariencia opaca y sucia al compararlos con los de la roca inalterada. Se observa también desarrollo de nuevas microfisuras y crecimiento de las ya existentes (ver figura 4).

En el granito Amarelo Ouro Brasil se desarrollan superficies de alteración, especialmente en los cristales de granate, uno de los

minerales que liberan hierro en los procesos de deterioro; también se verifica alteración en los cristales de feldespatos, cuya apariencia es sucia y opaca y con mayor desarrollo de microfisuras.

En el granito Verde Pavão, hay remoción de la clorita presente en las microfisuras y se observa alteración de los cristales de piroxeno, plagioclasa y en menor proporción del k-feldespato. El color verde típico de los feldespatos en la roca inalterada cambia a tonalidades amarillas en las sometidas a ataque ácido. También se presenta aumento considerable del espaciado y de la densidad de microfracturas en la roca alterada (ver figura 5).

No se detectan cambios significativos observables al microscopio en los granitos Vermelho Capão Bonito, Branco Cotton White e Cinza Prata Imperial. Estos cambios se restringen a incipiente alteración de los cristales de K-feldespato y de plagioclasa.

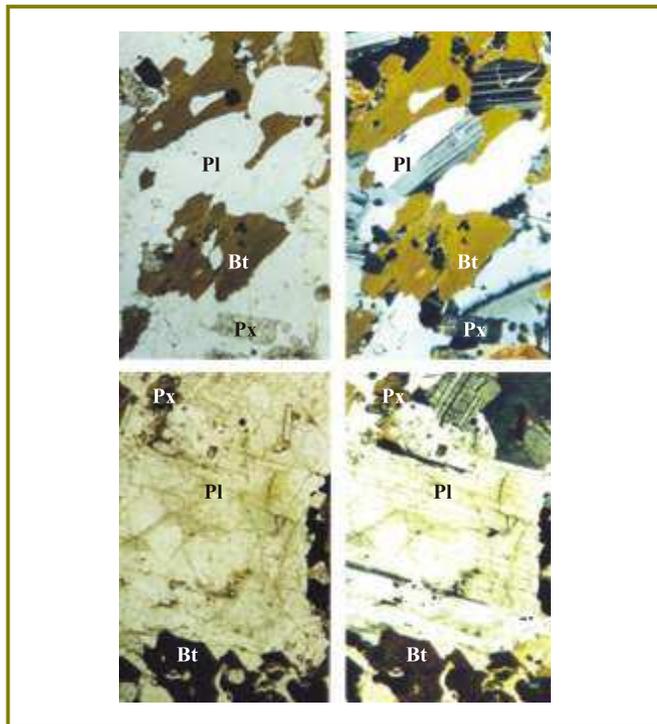


Figura 4. Alteración del granito Preto São Gabriel. Ensayo de lixiviación estática con solución de H₂SO₄. Imagen de roca inalterada (sup) e imagen después de ataque ácido (inf). Se observan cambios de tonalidad, intensificación del microfracturamiento y alteración superficial de los cristales de plagioclasa. (Pl) plagioclasa, (Bt) biotita, (Px) piroxeno. Izq: nicoles paralelos. Der: nicoles cruzados. Aumento 25X.



Figura 5. Mudanzas de aspecto y microfracturamiento de cristales de K-feldespato (Granito Verde Pavão). Izquierda (roca inalterada), color verde y fracturas rellenas de clorita y óxidos. Derecha (roca alterada), cambio de tonalidad a amarillo, aumento de la densidad de microfisuras y pérdida por lixiviación del material de relleno de las fisuras. Aumento 100X.

3.3 Pérdida de masa y cambios en Porosidad y Absorción de agua

Además de las observaciones hechas en las baldosas y en láminas petrográficas, las muestras sometidas a los ensayos de envejecimiento acelerado, fueron pesadas antes y después de los ensayos para verificar la variación de masa. La pérdida de masa (? m), definida como la variación porcentual de la masa después de los ensayos (mf) en relación con la masa inicial (mi), representa la cantidad de material disuelto, debido a los procesos de lixiviación ocasionados por las sustancias reactivas en los ensayos de lixiviación estática y exposición a los vapores de SO₂. Todos los granitos experimentaron pérdida de masa (ver tabla 3), siendo ésta mayor para los granitos “Preto São Gabriel” y granito “Verde Pavão”.

Análisis de los fluidos residuales de las soluciones ácidas realizados con Espectrómetro de plasma Inductivo-AES, permiten determinar los cationes lixiviados durante el proceso, los cuales están directamente relacionados con la pérdida de masa registrada (ver tabla 4).

Tabla 3. Ejemplo de pérdida de masa para una probeta de las diferentes litologías después del ensayo de lixiviación estática. Solución reactiva HCl (concentración 0,25%v/v).

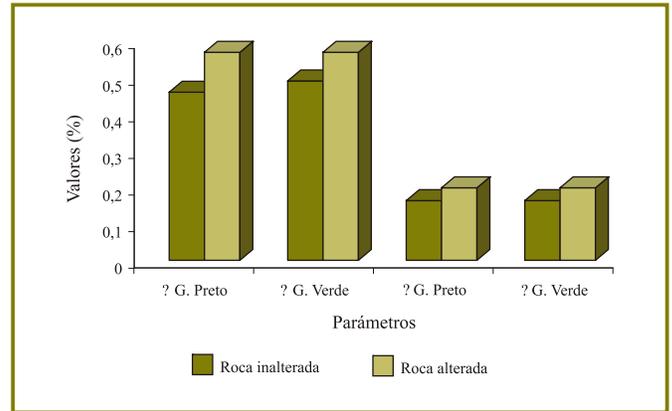
| Granito | mi (g) | mf (g) | Δm (g) | Pérdida (%) |
|-----------------------|--------|--------|--------|-------------|
| Preto São Gabriel | 361,52 | 360,29 | 1,23 | 0,34 |
| Verde Pavão | 544,5 | 543,13 | 1,37 | 0,25 |
| Vermelho Capão Bonito | 231,9 | 231,87 | 0,03 | 0,12 |
| Cinza Prata Imperial | 502,82 | 502,23 | 0,59 | 0,11 |
| Amarelo Ouro Brasil | 488,79 | 488,29 | 0,50 | 0,10 |
| Cotton White | 529,02 | 528,74 | 0,28 | 0,05 |

Tabla 4. Elementos lixiviados (ppm) en ensayo de lixiviación estática. Solución reactiva HCl.

| Granito | Al | Ca | Fe | Mg | Si | K | Na |
|----------------------|------|------|------|------|------|----|----|
| Preto São Gabriel | 35,0 | 516 | 163 | 108 | 73,2 | 30 | 8 |
| Verde Pavão | 36,0 | 145 | 422 | 46,0 | 40,4 | 13 | 4 |
| Amarelo Ouro Brasil | 20,2 | 207 | 41,1 | 7,8 | 21,3 | 6 | 4 |
| Cinza Prata Imperial | 58,9 | 427 | 103 | 36,4 | 68,3 | 50 | 5 |
| Vermelho | 54,8 | 133 | 169 | 15,1 | 46,2 | 30 | 2 |
| Branco Cotton White | 10,9 | 41,9 | 3,7 | 4,1 | 30,1 | 5 | 5 |

Tabla 5. Variación de los índices físicos de los granitos Preto São Gabriel y Verde Pavão después del ensayo de lixiviación estática.

| Índices Físicos | | | | | |
|-------------------|----|-------|---------|----------|------------|
| Litología | | M.A.S | M.A.St | apar (%) | γ apar (%) |
| | | Kg/m3 | (Kg/m3) | | |
| Preto São Gabriel | AE | 2,958 | 2,963 | 0,462 | 0,156 |
| | DE | 2,954 | 2,959 | 0,573 | 0,194 |
| Verde Pavão | AE | 2,713 | 2,723 | 0,497 | 0,167 |
| | DE | 2,701 | 2,709 | 0,569 | 0,199 |



ÚZ¼ZÚ0º ng¶h"èScí0p÷#c±G-9"èÈÀhs³6V;Á¶Öpφ.Ää
fæôtÝŽA·i;gμδ5, ¯p>ªq+cŽ γ|ÖyZøÈñ†ÿ·μÖδ5

k ?Æ ì:Lª~RWĠ` =O-ù†)Ÿ* Yà-2>ÙIJN a¿ôAÈ -<Ø0},
ã05"á3 - üZafÁ×5"g-U"~og' Obc™MAÿíia ÁH], S {X¶Et
Ä"pÍ. Üä¶bAF"òRÿòðCENcépLòw|@¶p½òR ¥I Èe³N
•• ÈËÜ%æ& ¶¶ÇI"ß ÄüüŸŸÁÓÈÆÖceÚŸYVQb*
æè5"ñwŠníÈ&sÖäBü"G"ð@EÈw&D.¶ NRºh9CE2Jñ0Cÿt
æè5"ñwŠníÚ9†:â÷V£)‡.Šèn¼I-Ö¶{ÉÍŸ;ÿL P@úYIEžüþã0C;íL
—è•NŽÍ —ã2E' —l¶¶ j,(†ÓZ, s†éü,ÑÖèFòñxÖEÜZ -¿,£ñ>
Ò0«Wò-¶l ...ã1U³ÆSq;ðÈDñá?DòV£ñNÓæD:£µa@Ží:µ;%öŽ
[!@žº7•y~µaçmIþ<Š×á0~ÜbÀÓ0);Üp#ñ2e)‡ák'di (vÔ!šðSX
ã !š K™÷WY-æ%ö)ÈP@"á±7,,ãðSÚ'tuY)Á rD.RØ&†f ²8†<
X|,Šèi @SÜPdA '® 3EÞ=¶Et†ã2; ùF"¶IR"È(†,é6"y á2•
[â/þ.,âç Ö0=>@YŠ¶m¼A}ÈQ×%6AWµP@ÁGÉPÓA>æ kñ?CEŠ
Šèü,Íá/Ü"òVÍ†òæD:Ÿ0%ãÈ'uúH;òC"ñ /Ü8=vzØ7,¶òV[á?D
ã ±æ³°eÈJN fDòR íò f 4'à-èò¼hµªa ÈtxÖéúÍV'OoöC•
Ôã2róA °pñtúXkÉ'-ùñNXYòQZ¶J&ñóAÈ&šx¶Á,ĐÓ@i;M<ùSX
Šè†ó!&.,-ãBà>EbÀ"ãÉI+ÈP@LšcúGLÒ ~Èj-U£Y&.,"éÍ0 2d²Pèš
Ò05/fD.3sA 0ŽisùWµPÜ2E,ÇE7<šè5zÈ&%f'¼CÞ 5"ñOÖ3FòñCÈ
—âCU|-<QÍ ñéü,Đ0Zß,7a¶+x×JN>éG~òGS &t0}b³-yÆŠ«éiO"
Ò0ùþæüF@U³ £ñO-ne<šçñI DÉ*±þ,q³/δ'.d±"oöC;¿j LQY
—óúè...j.çdð—òS '.Çp+>TÚ8†ZÓZBè8K©ò)%×δ;òP@ÁÓ1
nI*=-O-TM)è6f=

Observaciones al microscopio electrónico de barrido (MEV) permitieron corroborar los cambios observados en el microscopio petrográfico en relación al microfracturamiento. Se registró un aumento importante del espaciado de las microfisuras después de los ensayos de alterabilidad y la generación de nuevas fisuras interconectadas, tanto intergranulares como intragranulares en los cristales de piroxeno y plagioclasa. También fue observada la corrosión en los bordes de los cristales de biotita (ver figura 7).

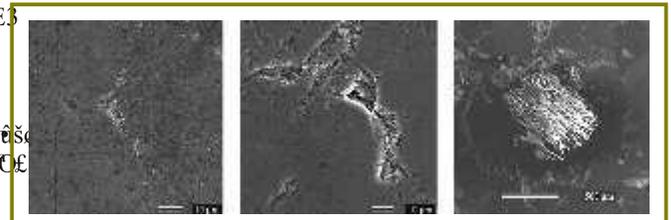


Figura 7. Microfisuramiento de plagioclasa antes (izquierda) y después (centro) de los ensayos de alteración acelerada. Corrosión de bordes de cristales de biotita (derecha). Granito Preto São Gabriel.

Fue posible observar en el microscopio electrónico de barrido MEV, los efectos producidos por la cristalización de sales solubles en las rocas (ver figura 8), semejantes a los generados por la formación de hielo en los poros. Estas sales pueden ser provenientes de las argamasas usadas para la instalación, de los materiales usados en los procesos de restauración o conservación de la piedra natural, o también, provenientes del suelo por ascensión capilar. Pueden estar en solución insaturada, saturada o sobresaturada. El paso de un estado a otro puede producirse por la adición de sal, por la evaporación de agua o por variación de la temperatura.

Si en el interior de un material poroso existe una solución salina, el fenómeno de cristalización en los espacios capilares es inevitable, la cual genera una presión sobre las paredes o a lo largo de la estructura del propio material, que será mayor, cuanto más elevada sea su concentración (López J.C. et al., 1996). Las sales pueden ejercer fuerzas de expansión, debido a la cristalización, semejantes a las desarrolladas por el congelamiento de aguas intersticiales, capaces de provocar la fragmentación de minerales adyacentes, de forma lenta y progresiva llegando inclusive a romper por completo las losas de granito utilizadas como revestimiento, haciéndose necesaria en muchas ocasiones la remoción total del material usado como fachada.

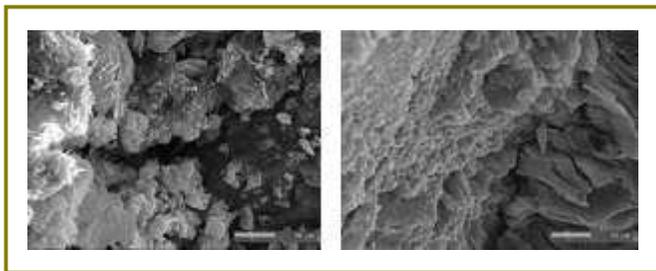


Figura 8. Efecto de La cristalización de Sales en el interior de microfisuras de un cristal de plagioclasa (Granito Verde Pavão). Cristalización incipiente (izq). Proceso en estado avanzado (der).

El proceso de concentración y cristalización de sales se observó con mayor intensidad en los granitos que poseen cristales de cuarzo y plagioclasa de mayor tamaño (granitos Ouro Brasil y Verde Pavão), que presentan correlación con el proceso de absorción de forma linealmente positiva. La explicación (Bezerra de Melo & Da Costa, 2002), radica en la facilidad que presenta el cuarzo de fracturarse bajo presión y la alterabilidad de la plagioclasa, factores estos que facilitan en los dos minerales la formación de poros y microfracturas. En los demás ensayos no fueron observados procesos importantes de cristalización de sales.

4. APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS CON RELACIÓN AL USO

De acuerdo con los resultados de los ensayos de alteración acelerada, no es recomendable el uso de los granitos Preto São Gabriel y Verde Pavão para el revestimiento de fachadas o de pisos externos. Estos granitos pueden ser mejor aprovechados como elementos decorativos internos, no expuestos al medio ambiente generalmente contaminado de las grandes ciudades y que no requieran de constantes procesos de limpieza.

El granito amarillo Ouro Brasil, debe ser usado con precaución en ambientes externos, procurando para su conservación el uso de sustancias hidrórepelentes previamente ensayadas en la roca, que eviten o minimicen los efectos de la oxidación de los cristales de granate y de los sulfuros metálicos presentes en la roca. Los granitos de composición cuarzo feldespática son los más recomendados para uso en revestimientos externos, en este caso el granito Vermelho Capão Bonito. Aquellos que presentan menor grado de fisuramiento y baja proporción de minerales susceptibles a alterarse también pueden utilizarse con los debidos cuidados para su conservación. Del conjunto ensayado cumplen con estas condiciones el granito Cinza Prata Imperial y el Blanco Cotton White, los cuales experimentaron menores procesos de deterioro en los diversos ensayos efectuados. Estos granitos también son recomendados para uso en pisos internos y detalles de acabados que requieren de limpieza frecuente (por ejemplo piezas decorativas, baños etc.).

Considerando su alto valor comercial, los granitos Verde Pavão, Amarelo Ouro Brasil y Preto São Gabriel, deben ser usados en ambientes que permitan su conservación, como paredes y pisos internos con bajo índice de tráfico peatonal y como elementos decorativos que no necesiten de limpieza constante, evitándose así el deterioro causado por el uso de sustancias industriales para su manutención.

5. CONCLUSIONES

Los ensayos de alteración acelerada cumplen con el objetivo de predecir los procesos de deterioro resultantes de la aplicación de rocas ornamentales en ambientes externos e internos, cuando son usadas como revestimientos, pisos o elementos estructurales y decorativos, ya sea en lugares comerciales o residenciales. Los ensayos efectuados permiten una visión global de los cambios estéticos, mineralógicos y geomecánicos al ser expuestas a los principales agentes físicos y químicos que las deterioran.

Los ensayos de alteración acelerada permiten determinar que los granitos más susceptibles de experimentar procesos de deterioro son el Preto São Gabriel y el Verde Pavão, seguido por el granito Amarelo Ouro Brasil. Los granitos Cinza Prata Imperial y Vermelho Capão Bonito, experimentan algunos cambios pero son menos vulnerables a la acción del medio ambiente o a las sustancias industriales. El granito Cotton White es muy poco susceptible a procesos de alteración.

La alterabilidad del Granito Preto São Gabriel está relacionada esencialmente con la composición mineralógica debido a que presenta plagioclasa, rica en calcio y minerales ferromagnesianos, siendo menos incidente el grado de fisuramiento. En los demás granitos, los procesos de deterioro están fuertemente relacionados con la presencia de microfisuras, el tamaño de los cristales (que puede incidir en el aumento del microfracturamiento durante los procesos de beneficio) y en menor medida con la composición mineralógica. En el caso del granito Amarelo Ouro Brasil, la susceptibilidad a los procesos de deterioro es facilitada por presencia de granates ricos en hierro y de algunos sulfuros metálicos. Todos ellos ayudan en los procesos de oxidación de esta roca.

Considerando la presencia de sustancias como ácido clorhídrico, ácido nítrico y ácido sulfúrico en el aire contaminado de grandes centros urbanos y ambientes litorales y teniendo en cuenta la susceptibilidad de los granitos Preto São Gabriel, Verde Pavão y Amarillo Ouro Brasil, no se recomienda el uso de estas litologías en revestimientos exteriores ya sea en fachadas o pisos.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación del proyecto a FAPEMIG “Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais” por la financiación del trabajo, enmarcado en el proyecto CRA 247/97; al CNPq “Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico” por la concesión de la beca al primer autor, para la continuación de la investigación de estos procesos en el programa de Doctorado en Geología Económica y Aplicada de la UFMG. Igualmente al Laboratorio de Caracterización Tecnológica de rocas ornamentales LABTEC-ROCHAS por la colaboración en la ejecución de los ensayos.

7. REFERENCIAS

- Aires-Barros, L. (2001). “As rochas dos monumentos portugueses. Tipologias e patologias”. Volumen I. Lisboa. Instituto Português do Patrimônio Arquitetónico. 590p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - Abnt (1992). Rochas para revestimento. Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente. Norma NBR 12766. 8p.
- Artur, A. C., Meyer, A., Wernick, E. (2001). Características tecnológicas de granitos ornamentais: a influência da mineralogia, textura e estrutura da rocha. Dados comparativos e Implicações de utilização. In Anais. I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais. Salvador-Bahia. p. 13-19.
- Becerra Becerra, J. E. & Costa, A. G. (2005). Avaliação do grau de oxidabilidade de rochas graníticas com aplicação ornamental. In Anais. Primeiro Congresso Internacional de rochas ornamentais. CD-ROM, CETEM. Rio de Janeiro.
- Becerra Becerra, J.E. (2004). “Alterabilidade de rochas com aplicação ornamental: procedimentos analíticos para sua avaliação”. Dissertação de Mestrado em Geologia Econômica e Aplicada. IGC-UFMG. 117 p.
- Becerra Becerra, J.E., Costa, A.G. (2003). Procesos de alterabilidad en granitos ornamentales brasileños. Diagnóstico y técnicas de evaluación. In Memorias. IX Congreso Colombiano de Geología. Medellín-Colombia. p. 275-278.
- Bezerra de Melo, E. & Da Costa, F. M. O. (2002). Escolha de tipos texturais de rochas e sua aplicação ornamental. In Anais.. III Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. CD-ROM, CETEM. Rio de Janeiro.
- Calvo, B. & Maya Sánchez, M. (2001). Avanços e Transferência Tecnológica em Rocha Ornamental. Série Rochas e Minerais Industriais. CETEM. 183p.
- European Committee for Standardization Cen (2000). Natural Stone Test Methods. Petrographic examination. Norma EN 12407. 8p.
- European Committee for Standardization Cen (1999). Natural Stone Test Methods. Determination of resistance to salt crystallization. Norma EN12370. 7p.
- European Committee for Standardization Cen (2002). Natural Stone Test Methods. Determination of resistance to ageing by thermal shock. Final Draft. Norma EN 14066. 8p.
- European Committee for Standardization Cen (2002). Natural Stone Test Methods. Determination of resistance to ageing by SO₂ action in the presence of humidity. Final Draft. Norma EN 13919. 7p.
- López González-Mesones, F. (2002). La interpretación de los ensayos de caracterización de la piedra natural en el marco de la nueva normativa europea. In Anais. III Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Curso de rochas ornamentais para projetos arquitetônicos e urbanísticos. CD-ROM, CETEM. Rio de Janeiro.
- López, J.C. Et al., 1996. Manual de Rocas Ornamentales. Madrid. Editora Entorno Gráfico, S.L. 695p.