

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

Área de Concentração em Geologia Aplicada

**ESTUDO COMPARATIVO DE ALGUMAS ROCHAS ORNAMENTAIS
MÁFICAS TIPO “GRANITO PRETO”, POR ALTERABILIDADE
ACCELERADA E GELO-DEGELO: UMA NOVA ABORDAGEM
GEOESTATÍSTICA.**

Ely Brasil de Arruda Luna Cavalcanti

Recife, 2013

Ely Brasil de Arruda Luna Cavalcanti

Geóloga, Universidade Federal de Pernambuco, 2004

Mestre, Universidade Federal de Pernambuco, 2008

**ESTUDO COMPARATIVO DE ALGUMAS ROCHAS ORNAMENTAIS
MÁFICAS TIPO “GRANITO PRETO”, POR ALTERABILIDADE
ACCELERADA E GELO-DEGELO: UMA NOVA ABORDAGEM
GEOESTATÍSTICA.**

Tese que apresentou ao Programa de Pós-Graduação em Geociências do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, orientada pelo Profº Adejardo Francisco da Silva Filho, como preenchimento parcial para obter o grau de Doutora em Geociências, área de concentração Hidrogeologia e Geologia Aplicada, defendida e aprovada em 20 de dezembro de 2013.

RECIFE, PE

2013

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

C376e

Cavalcanti, Ely Brasil de Arruda Luna.

Estudo comparativo de algumas rochas ornamentais máficas tipo "Granito Preto," por alterabilidade acelerada e gelo-degelo: uma nova abordagem geoestatística / Ely Brasil de Arruda Luna Cavalcanti. - Recife: O Autor, 2013.

152 folhas, il., sigl., tabs.

Orientador: Prof^o. Dr^o. Adejardo Francisco da Silva Filho.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação Geociências, 2013.

Inclui Referências e Anexos.

1. Geociências. 2. Rochas ornamentais máficas. 3. Alterabilidade .
4. Metodologia geoestatística. de avaliação. I. Silva Filho, Adejardo Francisco da. (Orientador) II. Título.

UFPE

551 CDD (22. ed.)

BCTG/2013-070

**ESTUDO COMPARATIVO DE ALGUMAS ROCHAS ORNAMENTAIS MÁFICAS
TIPO “GRANITO PRETO”, POR GELO-DEGELO E ALTERABILIDADE
ACCELERADA: UMA NOVA ABORDAGEM GEOESTATÍSTICA.**

Ely Brasil de Arruda Luna Cavalcanti

APROVADA

Adejardo Francisco da Silva Filho

20 de Dezembro de 2013

Eldemar de Albuquerque Menor

20 de Dezembro de 2013

José de Araújo Nogueira Neto

20 de Dezembro de 2013

Márcio Luis Siqueira Campos

20 de Dezembro de 2013

Júlio César de Souza

20 de Dezembro de 2013

AGRADEÇO A DEUS por ter me permitido avançar mais uma etapa importante em minha vida profissional.

Ao meu esposo João Augusto pelo companheirismo.

À minha filha Maria Natália razão da minha vida.

Dedico aos meus Pais (*in memoriam*), pelo desejo de ver os meus avanços profissionais.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus agradecimentos às pessoas e entidades:

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro na qualidade de bolsa de doutorado.

Agradeço ao Prof. Adejardo Francisco pela orientação e amizade.

Ao Prof. Eldemar de Albuquerque Menor pelo apoio irrestrito na orientação e pela sua sabedoria que me fizeram chegar tão longe.

Ao Prof. Gorki Mariano pelos conselhos nos momentos difíceis dessa trajetória.

Ao Prof. Maurício Rangel pela valiosa ajuda e esclarecimentos nas análises petrográficas.

Ao Prof. Marcelo Reis por ceder o Laboratório de Geoquímica e o LEMA para os ensaios de alterabilidade e petrografia respectivamente.

Ao Prof. Júlio César pela disponibilidade do Laboratório de Rochas Ornamentais DEMINAS - UFPE

Ao Laboratório de Saneamento Ambiental (Depto. Eng. Civil-UFPE) na pessoa do Ronaldo, pelo fornecimento da água deionizada.

Ao químico Wagner pelo suporte no ensaio de Alterabilidade Acelerada.

Ao secretário Ígor do PPGEOC pela atenção e apoio administrativo.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“Nascemos para manifestar
a glória do Universo que está dentro de nós.
Não está apenas em um de nós: está em todos nós.
E conforme deixamos nossa própria luz brilhar,
inconscientemente damos às outras pessoas
permissão para fazer o mesmo.
E conforme nos libertamos do nosso medo,
nossa presença, automaticamente, libera os outros.”

[Nelson Mandela](#)

RESUMO

Um estudo comparativo entre rochas ornamentais máficas brasileiras, comercialmente consideradas como variedades "negras", é apresentado neste estudo. Neste sentido, foram adotadas normas ABNT (com algumas adaptações) para avaliação destas rochas ornamentais, envolvendo os parâmetros: peso seco, peso úmido, ensaios gelo-degelo, brilho, e ensaios de alterabilidade acelerada sob ataque ácido, utilizando-se soluções de H_2SO_4 , HNO_3 , mistura H_2SO_4/HNO_3 e HCl , com $pH = 3$ inicial. Em cada intervalo semanal, durante um ciclo de 8 semanas, foram tomados os valores de pH das soluções ácidas residuais e o peso seco dos corpos de prova. Os ensaios gelo-degelo incluíram dois ciclos de 25 dias, ao termo dos quais foram determinados: peso seco e perda relativa de peso do corpo de prova original. Os resultados foram dispostos em diagramas de duas variáveis: $pH \times$ tempo e peso seco $\times$ tempo, possibilitando um estudo de regressões lineares destas variáveis. Este tratamento estatístico permite distinguir diferentes fácies de um mesmo tipo de rocha máfica e a definição de vulnerabilidade relativa entre exemplares distintos destas rochas, constituindo-se em nova metodologia para avaliação de rochas ornamentais. O método proposto, baseado em tratamento estatístico a partir de resultados físicos e químicos de ensaios de bancada, é simples, de fácil reprodutibilidade e aplicabilidade, evitando-se critérios subjetivos de avaliação sobre níveis prévios da alteração dos minerais.

Palavras-chave: rochas ornamentais máficas, alterabilidade, metodologia geoestatística de avaliação.

ABSTRACT

A comparative study of some Brazilian ornamental mafic rocks, commercially considered as "black" varieties, is presented in this study. In this sense, ABNT standards (with some modifications) were adopted for the evaluation of these ornamental rocks using the follow parameters: dry weight, wet weight, freeze resistance testing, brightness and static acid lixiviation (initial pH = 3) using H₂SO₄, HNO₃, H₂SO₄/HNO₃ mixture and HCl solutions. In each weekly interval during a course of eight weeks, the pH of the residual acidic solutions and the dry weight of the specimens were taken. The freeze-thaw tests included two cycles of 25 days, after which were determined: dry weight and relative weight loss of the specimen original. The results were scattered in diagrams of two variables: pH x time and dry weight x time allowing a study of linear regressions of these sets of variables. This statistical treatment allows to distinguishing different facies of the same type of mafic rock, and the definition of relative vulnerability among different specimens of these rocks, providing a new evaluation methodology for ornamental rocks. The proposed method based on statistical treatment of physical and chemical results from bench tests is simple, and have an easy reproducibility and applicability, avoiding subjective assessment criteria for levels of the previous mineral alteration

Keywords: ornamental mafic rocks, **lithic depletion**, geostatistical evaluation methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 a: Localização das áreas dos litotipos estudados (municípios de São Francisco e Casserengue, PB)

Figura 1 b: Localização das áreas dos litotipos estudados (municípios de Colatina, Aracruz e Iconha, ES).

Figura 3.1: Ordem de alteração química das rochas (com inclusão do basalto), conforme conceitos de Minette (1982).

Figura 3.2: Tipos de alteração em função da temperatura e da precipitação (Peltier, 1950).

Figura 4.1: Mapa geológico simplificado para a região de Colatina ES -2011.

Figura 4.2: Pedreira do Preto São Gabriel em Colatina-ES

Figura 4.3: Mapa geológico simplificado para a região do (PSM) na Folha Solânea – 2008.

Figura 4.4: Pedreira do Preto São Marcos (PSM) em Casserengue-PB.

Figura 4.5: Pedreira do Preto Aracruz (PAC).

Figura 4.6: Pedreira do Ouro Negro, Rio Novo do Sul - ES.

Figura 4.7: Mapa simplificado da folha Sousa.

Figura 4.8: Mapa de Semi-detalle da ocorrência do Granito Preto São Francisco.

Figura 4.9: Vista da área dos afloramentos do GSF.

Figura 4.10: Afloramento do preto São Francisco.

Figura 5.1: Fotomicrografia do Preto São Gabriel-PSG (A, B, C e D)

Figura 5.2: Fotomicrografia do Preto São Marcos-PSM (A, B, C e D)

Figura 5.3: Fotomicrografia do Preto Aracruz-PAC (A, B, C e D).

Figura 5.4: Fotomicrografia do Ouro Negro-ON (A, B, C e D).

Figura 5.5: Fotomicrografia – Preto São Francisco.

Figura 5.6: Modelo de evolução magmática da série Ca-alcalina, segundo Bowen (1928).

Figura 5.7: Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida (H_2SO_4) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” Ouro Negro.

Figura 5.8: Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida (HNO_3) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” Ouro Negro.

Figura 5.9: Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida ($\text{H}_2\text{SO}_4 / \text{HNO}_3$) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” Ouro Negro.

Figura 5.10: Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida (HCl) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” Ouro Negro.

Figura 5.11: Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida (H_2SO_4) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” São Marcos.

Figura 5.12: Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida (HNO_3) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” São Marcos.

Figura 5.13: Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” São Marcos.

Figura 5.14a, b Distribuição em *scatterplot* das relações entre volume do corpo de prova e o correspondente peso seco, relativa a “granitos pretos”.

Figura 5.15: A e B Gráficos Equação de 2º Grau Log (ph x semanas)

Figura 5.16: A e B Gráficos Equação de 2º Grau Log (ph x semanas)

Figura 5.17: A e B Gráficos Equação de 2º Grau Log (ph x semanas)

Figura 5.18: Diagramas de duas variáveis: brilho x tempo – Ouro Negro

Figura 5.19: Diagramas de duas variáveis: brilho x tempo – Preto São Marcos

Figura 5.20: Relações entre peso seco (g) de corpos de prova do Preto Aracruz em dois ciclos de 25 dias, submetidos a ensaios de gelo-degelo.

Figura 5.21: Relações entre peso seco (g) de corpos de prova do Preto São Marcos

em dois ciclos de 25 dias, submetidos a ensaios de gelo-degelo.

Figura 5.22: Relações entre peso seco (g) de corpos de prova do Preto São Gabriel em dois ciclos de 25 dias, submetidos a ensaios de gelo-degelo.

Figura 5.23: (a, b) e (c, d): Aspectos de perda de massa de granitos pretos sob ensaios de gelo-degelo, com particulados visualmente (a,b) perceptíveis e com particulados em grande parte com dimensões abaixo da acuidade visual humana (c,d).

Figura 5.24: Relações entre peso seco (g) de corpos de prova do Ouro Negro em dois ciclos de 25 dias, submetidos a ensaios de gelo-degelo.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Rochas Ornamentais – Principais Estatísticas - Brasil

Tabela 3.1: Métodos para avaliação da alteração e alterabilidade de rochas.

Tabela 3.2: Índices geoquímicos para avaliação da alterabilidade de rochas.

Tabela 3.3: Índices petrográficos para avaliação da alterabilidade de rochas.

Tabela 5.1: Composição modal dos litotipos estudados.

Tabela 5.2: Reatividade comparada das diversas soluções ácidas residuais.

Tabela 5.3: Sumário dos resultados de lixiviação ácida sobre granitos pretos, destacando os valores de “Tempo” para o primeiro evento de $\text{pH} = 3$.

Tabela 5.4: Valores médios de perda relativa de brilho sobre corpos de prova (8 semanas), considerando-se soluções ácidas per si, e valores médios de perda relativa de brilho sobre o conjunto de placas/soluções ácidas, considerando-se os diversos granitos pretos testados.

Tabela 5.5: Relações entre peso seco de corpos de prova submetidos a ensaios de gelo-degelo, em dois ciclos de 25 dias.

Tabela 5.6: Avaliação da vida útil de placas de revestimento em granitos pretos selecionados, por regressão linear de 1º grau.

LISTA DE ABREVIATURAS

ON – Ouro Negro
PAC – Preto Aracruz
PSF – Preto São Francisco
PSG – Preto São Gabriel
PSM – Preto São Marcos
CPX – Clinopiroxênio
OPX – Ortopiroxênio
OP – Opacos
Hbl – Hornblenda
Bt – Biotita
Plag - Plagioclásio
Me – Minerais essenciais
Mac – Minerais acessórios
Ma – Minerais de alteração
It – Intensidade de microfissuramento intergranular
Ig - Intensidade de microfissuramento intragranular
Itg - Intensidade de microfissuramento transgranular
MTE –Ministério do Trabalho e Emprego
MDIC -Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos e Justificativas	16
1.2 Localização das áreas dos litotipos estudados	17
CAPÍTULO II – ROCHAS ORNAMENTAIS UMA REVISÃO	18
2.1 Origem das Rochas Ornamentais e de Revestimentos	18
2.2 Caracterização Tecnológica	20
2.3 O Comércio de Rochas Ornamentais no Brasil	21
CAPÍTULO III – ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE DAS ROCHAS	25
3.1 Conceito de Alteração	25
3.2 Fenômeno da Alteração	27
3.3 Mecanismos de Alteração	27
3.3.1 Química	28
3.3.2 Física	29
3.4 Agentes de Alteração	29
3.4.1 Água	30
3.4.2 Vento	32
3.4.3 Temperatura	33
3.4.4 Agentes Biológicos	34
3.4.5 Poluentes Atmosféricos	35
3.5 Avaliação da Alterabilidade de Materiais Rochosos	38
3.5.1 Alterabilidade das Rochas	38
3.5.2 Índices Geoquímicos	41
3.5.3 Índices Petrográficos	42
3.5.4 Índices Físicos	43

3.6 Perda de Brilho	45
3.7 Normas e Procedimentos para os Ensaios	45
3.8 Ataque Químico	48
CAPÍTULO IV – CONTEXTO GEOLÓGICO	49
4.1 Preto São Gabriel, Colatina – ES	49
4.2 Preto São Marcos, Casserengue – PB	52
4.3 Preto Aracruz, Aracruz – ES	54
4.4 Ouro Negro, Iconha/Rio Novo do Sul	55
4.5 Preto São Francisco, São Francisco – PB	57
CAPÍTULO V – AMOSTRAGEM E MÉTODOS	62
5.1 Introdução	62
5.2 Coleta de Amostras e Petrografia.	62
5.2.1 Preto São Gabriel	64
5.2.2 Preto São Marcos	66
5.2.3 Preto Aracruz	67
5.2.4 Ouro Negro	68
5.2.5 Preto São Francisco	69
5.3 Ensaios Tecnológicos – Resultados e Discussões.	71
5.3.1 Determinação de Índices Físicos	71
5.3.2 Ensaios de alterabilidade acelerada	72
5.3.3 Ensaios de brilho	88
5.3.4 Ensaios de gelo-degelo	92
CONCLUSÃO	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

ANEXOS		107
ANEXO I.	Tabelas de índices físicos dos ensaios de alterabilidade acelerada e gelo-degelo	108
ANEXO II.	Gráficos ph x semanas	112
ANEXO III.	Tabela de ph das soluções ácidas para cada material	120
ANEXO IV.	Fotos de alterabilidade dos litotipos estudados	121
ANEXO V.	Gráficos Equação de 2 ^o grau log (ph x semanas)	123
ANEXO VI.	Diagramas de duas variáveis: brilho x tempo dos litotipos estudados	139
ANEXO VII.	Tabela da composição modal	141
ANEXO VIII.	Fotomicrografia dos litotipos estudados	142
ANEXO IX.	Tabela de medição das placas para todos os materiais	146
ANEXO X.	Resultados dos valores médios dos ensaios de brilho (n= 27 medições) dos litotipos estudados, em diferentes tempos de distintos ataques ácidos	147
ANEXO XI.	Resultados de percentual de perda dos litotipos estudados ao final dos 2 ciclos do ensaio gelo-degelo	149
ANEXO XII.	Fotos do ensaio de gelo-degelo 1 ^o ciclo todos os litotipos estudados	150
ANEXO XIII.	Tabela de análises químicas	151

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Dentre os “granitos” negros, à exceção dos chamados “negros absolutos”, encontra-se agrupado todo um espectro de variedades máficas que se estendem desde gabros até dioritos, incluindo também noritos, peridotitos, e inclusive rochas anfibolíticas. Tacitamente escuros, suas aplicações emprestam sobriedade ou austeridade, inclusive nobreza, às construções civis ou elementos construtivos quando aí aplicados. Observados em detalhe, não são efetivamente de um “negro absoluto” porque incluem em suas paragêneses minerais escuros, mas não necessariamente negros como os piroxênios e anfibólios, cujos tons por vezes algo esverdeados, cinza-escuros e até de marrom-caramelados, resultam da grande variedade composicional existente nestes grupos minerais. Efetivamente, e distintivamente dos minerais félsicos mais comuns (e.g. quartzo, feldspatos, muscovitas), piroxênios e anfibólios são silicatos a aluminosilicatos de Fe-Mg-Ca envolvendo extensas possibilidades diadólicas que podem integrar quantidades variáveis de metais pesados (Ti, Co, Cr) nas suas constituições químicas, principalmente via substituição do Fe^{++} . Estas possibilidades, além da incidência de microinclusões e a ocorrência de exsoluções metálicas, respondem por variações no cromatismo destes minerais e aspectos de valorização estética como iridiscência, aureolamento de cristais, que combinados com a trama de feldspatos podem resultar em atraentes tons e sub tons de “negro sobre negro”.

Ao lado destes aspectos esteticamente favoráveis, os “granitos negros” são mais densos e mais vulneráveis ao intemperismo que os granitos *sensu strictu*, considerada a distribuição de seus principais minerais constituintes na Série de Bowen. Seja qual for a litologia, no entanto, toda a atmosfera gasosa poluente imprime ação nefasta quando, reagindo em meio úmido, acidifica as águas das chuvas (Flain, 1997). Estas lixiviam elementos constitutivos (minerais, elementos químicos componentes, etc.) das rochas assim como de monumentos expostos. Disto resulta que a proteção que os revestimentos exercem está associada à durabilidade da rocha e dos componentes de fixação, servindo de escudo contra a ação dos agentes agressivos que atuam na superfície e estrutura das edificações. Apesar desta ação protetora exercida por elementos líticos, não se deve olvidar que o resultado das reações entre soluções ácidas pluviais e ação diuturna dos

contrastes térmicos climáticos é danoso para os materiais pétreos, provocando em alguns casos o colapso total dos mesmos. Assim, as tendências demonstradas por estes materiais líticos sob ataques ácidos e efeitos de choque térmico são elementos essenciais para avaliação do desempenho das placas quando submetidas às condições intempéricas, tanto em suas propriedades físicas quanto estéticas.

Consideradas todas estas observações preliminares, e no contexto de aplicação como revestimento de interiores e exteriores, as rochas devem atender requisitos de qualidade para apresentar bom desempenho, tais como: alta resistência ao intemperismo e aos agentes químicos agressivos, quando utilizadas em revestimentos de exteriores; baixa capacidade de absorção de líquidos para evitar manchamentos e deteriorações; baixa dilatação térmica para garantir a estabilidade do revestimento; baixa condutividade térmica para promover conforto térmico; alta resistência à flexão para suportar a ação dos ventos; e boa resistência ao desgaste abrasivo para serem utilizadas como piso. Nesta instância, rochas máficas exigem precauções acentuadas, uma vez que nas suas composições dominam minerais de menor resistência mecânica e de menor resistência ao intemperismo.

1.1 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

A pesquisa tem como caso-estudo algumas rochas máficas brasileiras, comercialmente denominadas como “granitos pretos”, como grupamento litológico em cuja composição mineralógica: piroxênios, anfibólios, feldspatos (de dominância cálcica) e biotita, são os minerais dominantes na composição rocha-total. Nesta pesquisa são estudadas algumas propriedades de “granitos negros” brasileiros, entre si, as diferenciações de suas tendências sob o ataque de soluções ácidas, simulando-se em bancada a agressão intempérica que devem sofrer estes produtos quando aplicados em fachadas de construções civis. Neste estudo experimental, desenvolvido em laboratório por meio da simulação de ação poluente atmosférica sobre rochas máficas, pretende-se colocar em evidência as mais recorrentes rotas de deterioração deste tipo de litologia, como suporte para os critérios de escolha de seus produtos pelo mercado consumidor, e de sua aplicabilidade.

A exposição dos resultados pretende estabelecer novas formas de representação gráfica com base em estudos geoestatísticos. A morfologia diagramática destes

resultados deverá estabelecer critérios capazes de indicar a maior ou menor vulnerabilidade intempérica de “granitos pretos” quando comparados entre si, através de resultados numéricos ou “morfologias-padrão”, sem interveniências de critérios subjetivos de avaliação.

A permanente e ainda marcante demanda do mercado consumidor por este tipo de “granito” justifica a sua escolha como litologia-teste.

1.2 LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS DOS LITOTIPOS ESTUDADOS

As rochas máficas aqui selecionadas estão localizadas nos estados da Paraíba (municípios de São Francisco e Casserengue; Figura 01a) e do Espírito Santo (municípios de Colatina, Aracruz e Iconha; Figura 01b).

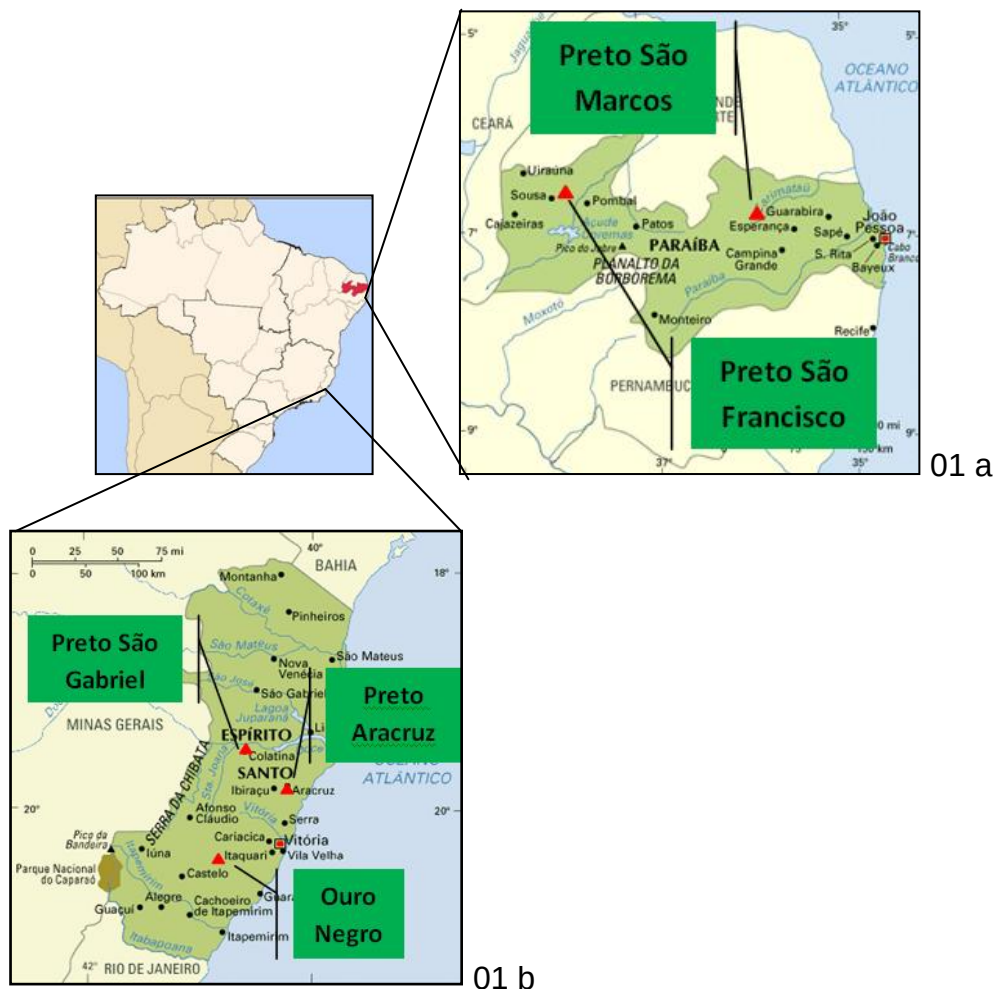


Figura 1 a, b. Mapa de localização das áreas das rochas máficas estudadas

CAPÍTULO II - ROCHAS ORNAMENTAIS: UMA REVISÃO

2.1. ORIGEM DAS ROCHAS ORNAMENTAIS E DE REVESTIMENTOS

As rochas ornamentais e de revestimento, também designadas pedras naturais, rochas lapídeas, rochas dimensionais, ou simplesmente materiais de cantaria, compreendem litologias que podem ser extraídas em blocos ou placas, cortados em formas variadas e beneficiados por meio de esquadreamento, polimento, lustre, etc. Seus principais campos de aplicação incluem tanto peças isoladas, como esculturas, tampos e pés de mesa, balcões, lápides e arte funerária, em geral, quanto edificações, destacando-se neste caso os revestimentos internos e externos de paredes, pisos, pilares, colunas, soleiras, dentre outros (Chiodi, 2007).

O termo “rochas ornamentais” tem as mais variadas definições. Para a ABNT (2012) são materiais rochosos naturais, submetidos a diferentes graus ou tipos de beneficiamento ou afeiçoamento (bruta, aparelhada, apicoada, esculpida ou polida), utilizados para exercer uma função estética.

Rocha para revestimento é definida como rocha natural que, submetida a processos diversos e graus variados de desdobramento e beneficiamento, é utilizada no acabamento de superfícies, especialmente pisos e fachadas, em obras de construção civil (ABNT, *op. cit*). Essa definição pode ser considerada similar àquela que a American Society for Testing and Materials (ASTM, 2001) propõe para “dimension stone”: pedra natural que foi selecionada, regularizada ou cortada em tamanhos e formas especificados ou indicados, com ou sem uma ou mais superfícies mecanicamente acabadas. As rochas para revestimento podem ser, desta forma, consideradas produtos do desmonte de materiais rochosos em blocos e de seu subsequente desdobramento em chapas, posteriormente lustradas e cortadas em placas.

Do ponto de vista comercial, as rochas ornamentais são basicamente subdivididas em granitos e mármore. Os “granitos” incluem as rochas silicáticas (ígneas ácidas a ultrabásicas, plutônicas e/ou vulcânicas, charnockitos, gnaisses e migmatitos), enquanto os “mármore” incluem os calcários cristalinos, assim como aqueles que

são sedimentares, passíveis de lustre. Ardósias, quartzitos e alguns outros materiais líticos relativamente recentes no mercado, como certos metaconglomerados e inclusive pegmatitos, também são largamente utilizados como rochas de revestimento. Técnica e comercialmente não devem ser englobados nos dois grupos acima, mas ainda não se dispõe de uma denominação comercial para eles. Alguns outros tipos litológicos como os quartzitos, serpentinitos, e ardósias, também são muito importantes setorialmente, embora sejam habitualmente aplicados desdobrados, não necessariamente lustrados (Frască, 2003).

Atualmente, as rochas ornamentais têm sido bastante utilizadas na construção civil, constituindo revestimentos verticais (paredes e fachadas) e horizontais (pisos) de exteriores e de interiores de edificações. Respondem pela proteção das estruturas e dos substratos contra o intemperismo e agentes degradadores domésticos e industriais, além de exercerem funções estéticas.

As rochas “graníticas”, pela sua enorme variedade de cores e padrões texturais e estruturais, são as mais utilizadas nos revestimentos de exteriores, tanto em pisos como em fachadas. Os mármore, por vezes importados, também possuem grande aceitação no mercado, sobretudo no tocante a revestimentos interiores. Do ponto de vista mercadológico, os produtos do setor têm características das manufaturas, e não das *commodities*. Até para as rochas brutas, comercializadas em blocos, o preço não é fixado em bolsas de mercadorias, dependendo da percepção de valor estabelecida pelos consumidores a partir de vantagens funcionais e/ou atributos estéticos diferenciados.

Também como referência, salienta-se que o setor de rochas ornamentais é essencialmente integrado por micro e pequenas empresas, com nível de informalidade ainda relativamente elevado. Pela pulverização geográfica e empresarial das atividades produtivas, os dados setoriais, exceto das exportações e importações brasileiras, são estimativos.

2.2. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

As rochas ornamentais, pelo fato de serem aplicadas em locais com características diferentes daquelas onde foram formadas, ficam sujeitas a condições “agressivas”, sejam elas antrópicas (atrito ou desgaste, choques, contacto com produtos de limpeza domésticos e industriais) ou naturais, tais como: variações de temperatura, exposição solar, água e gelo (DUARTE, 2003).

A caracterização tecnológica das rochas ornamentais e de revestimento (mineralógica, física, química e mecânica) é uma etapa fundamental para sua utilização correta, segura e econômica, devendo-se sobrepor às tendências da moda. Por exemplo, o conhecimento das características tecnológicas das rochas tem importância na seleção e avaliação prévia da qualidade, quando se destinam a pavimentos, em locais de pisoteio intensivo.

Para se caracterizar a adequação de uma rocha para um determinado fim, é necessário conhecer e/ou quantificar e qualificar algumas das suas características petrográficas, químicas, físicas e mecânicas.

A análise petrográfica de uma rocha ornamental é importante para estabelecer a sua classificação modal e destacar uma série de características, tais como, porosidade, descontinuidades, fissuras, estado de alteração, etc. A textura da rocha, nomeadamente as proporções dos diferentes minerais constituintes, assim como a sua natureza, origem, dimensões dos grãos e características dos materiais matriciais, são importantes para prever o comportamento das rochas mediante determinadas agressões físicas e químicas, como por exemplo, a ação deletéria dos ácidos em minerais máficos. O conhecimento da composição química de uma rocha serve essencialmente para destacar a presença de alguns compostos que, mesmo em pequenas quantidades, podem afetar a durabilidade da rocha num determinado meio. Também o conhecimento da composição química permite saber quais os elementos que mais facilmente contribuem para a alteração da rocha por reação química.

Dentre as características físicas destacam-se o peso específico aparente, a porosidade e o coeficiente de absorção de água. Uma rocha muito porosa tende a absorver mais água na sua estrutura, acelerando os processos de alteração química dos minerais, e alterações mecânicas como o processo de congelamento e descongelamento da água existente nos poros. Também, uma rocha menos porosa apresenta valores mais altos de resistência aos esforços mecânicos.

As características mecânicas mais usualmente determinadas são a resistência à compressão, a resistência à flexão, a resistência ao impacto, a resistência à compressão após os ciclos de gelo-degelo, a resistência ao desgaste abrasivo, a resistência às amplitudes térmicas, o módulo de elasticidade, o coeficiente de dilatação térmica linear e a micro dureza, além das características físicas e mecânicas básicas propostas por órgãos regulamentadores como ABNT, ASTM, etc.

2.3 O COMÉRCIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS NO BRASIL

A produção mundial de rochas ornamentais atingiu em 2011, estimadamente, 116 Mt, com a China respondendo por cerca de 37%. As exportações mundiais foram estimadas em 49,6 Mt (rochas brutas e beneficiadas). Segundo dados do Anuário Mineral Brasileiro (AMB), as reservas recuperáveis (30% das reservas medidas) são da ordem de 6 bilhões de m³ de rochas ornamentais no Brasil, não existindo estatísticas consolidadas sobre as reservas mundiais. O Brasil se posiciona em 5º lugar no ranking mundial de produção e em 3º nas exportações (2,9 Mt e US\$ 999,6 milhões).

A produção brasileira, estimada pela Abirochas, é de 9,0 Mt em 2011 (+1,1% em relação a 2010) e foi determinada pela manutenção do crescimento do mercado interno na ordem de 3,2%. A participação dos granitos e similares correspondeu praticamente a 50% da produção nacional, seguidos dos mármore e travertinos (17,8%), da ardósia (6,7%) e dos quartzitos foliados (6,7%). A redução das exportações de ardósias impactou na produção nacional, com perda de participação de 1,3% no total produzido. A Região Sudeste deteve 64,5% da produção nacional e a Nordeste 24,5%. As regiões Sul, Centro-Oeste e Norte atingiram em conjunto 11%.

Cerca de 90% da produção nacional está presente nos estados do ES, MG, BA, CE, PR, RJ, GO e PB. Apesar de MG produzir um percentual menor de granitos, destaca-se pela produção de ardósias, quartzitos foliados e pedra-sabão (enstatito). Ligados a rochas ornamentais existem no Brasil 18 Arranjos Produtivos Locais (APLs), distribuídos em 10 estados. Segundo a Abirochas, estima-se que a cadeia produtiva de rochas no Brasil tenha cerca de 7.000 marmorarias, 2.200 empresas de beneficiamento, 1.600 teares, 1.000 empresas dedicadas à lavra – com cerca de 1.800 frentes ativas e legalizadas, em cerca de 400 municípios e com cerca de 135.000 empregos diretos. Somente a extração e beneficiamento associado de ardósia, granito e mármore são responsáveis por 11.729 empregos formais, conforme dados do CAGET (MTE). As transações comerciais estão estimadas em valores da ordem de 4,4 bilhões de dólares.

De acordo com o MDIC, em 2011 as importações totais de rochas ornamentais reduziram-se 18,5% em peso, com 105,8 mil t e US\$ 67,9 milhões . Os mármore beneficiados (NCMs 6802.21.00 , 6802.91.00 e 6802.92.00) atingiram US\$ 49,5 milhões e 72 mil t. Os mármore brutos atingiram US\$ 13,1 milhões. Os mármore importados já representam o equivalente a 3% do consumo interno de rochas ornamentais no Brasil. As rochas artificiais, inseridas nas NCM 6810.19.00 e 6810.99.00, também tiveram expressiva elevação em 2011, atingindo US\$ 30,2 milhões (US\$ 17,9 milhões em 2009 e US\$ 25,1 milhões em 2010), uma elevação da ordem de 20,2%.

Já as exportações brasileiras totais em 2011 somaram 2,19 Mt, de acordo com o MDIC, correspondendo a US\$ 999,6 milhões (+4,22% no valor, em relação a 2010 e 7º exportador mundial). O maior mercado são os EUA com cerca de US\$ 507 milhões. As exportações de rochas silicáticas brutas (blocos) alcançaram US\$ 251,5 milhões (1,2 Mt) e as de mármore brutos (blocos) alcançaram US\$ 2,58 milhão (6,3 mil t). A exportação de pedra-sabão apresentou expressivo crescimento em 2011, atingindo US\$ 30,6 milhões (+122%) e a de ardósia mostrou redução para US\$ 59,3 milhões (-17,22%). Para o quartzito foliado a elevação foi de 14,15%, com US\$ 34,1 milhões. As rochas processadas atingiram US\$ 745,6 milhões e 0,99 Mt, com uma elevação de 1,54% em valor e redução de 4,94% em peso.

O preço médio dos blocos de granito atingiu US\$ 207,20/t e o de blocos manufaturados US\$ 837,70/t (elevação de 10,35% e 4,15%, respectivamente). A crise do mercado europeu, o valor do câmbio e a concorrência com a Espanha e China, neste mesmo mercado, contribuíram para a redução das exportações de ardósia em 2011.

No Brasil, o consumo aparente de rochas em 2011 foi estimado em 6,2 Mt, impulsionado novamente pela manutenção do crescimento da construção civil e de obras de infraestrutura, atendendo também eventos como a Copa de 2014. Com base nas estimativas da Abirochas, a produção de chapas serradas atingiu 68,1 milhões de m² em 2011 (43,7 milhões de m² para granitos, 19,6 milhões de m² para mármore e travertinos e 4,6 milhões de m² para ardósias, quartzitos foliados e outros tipos de rochas). Para mármore importados, estima-se 1,8 milhão de m², Tabela 2.1. É importante ressaltar que novas regiões no interior do país também passaram a produzir e beneficiar rochas, com menor custo de frete, estimulando o crescimento do mercado interno (principalmente nas Regiões Nordeste, Centro-Oeste e Norte).

Tabela 2.1 – Rochas Ornamentais – Principais Estatísticas - Brasil

Discriminação		Unidade	2009 ^(p)	2010 ^(p)	2011 ^(p)
Produção ⁽¹⁾	Produção total de Rochas	(t)	7.600.000	8.900.000	9.000.000
	Mármore em bruto ⁽²⁾	(t)	14.910,15	21.242,96	23.985,74
Importação	"Granitos" em bruto ⁽³⁾	(10 ³ US\$ FOB)	6.557,16	10.494,35	13.088,02
	Rochas processadas ⁽⁴⁾	(t)	621,32	1.786,83	1.310,76
		(10 ³ US\$ FOB)	348,86	1.475,72	707,42
		(t)	51.082,74	67.910,05	80.481,14
Exportação	Mármore em bruto ⁽²⁾	(10 ³ US\$ FOB)	29.196,98	39.467,34	54.097,18
	"Granitos" em bruto ⁽³⁾	(t)	5.646	4.865	6.309,61
		(10 ³ US\$ FOB)	895,67	1.462,29	2.583,18
	Rochas processadas ⁽⁴⁾	(10 ³ US\$ FOB)	142.092,07	223.426,92	251.447,52
Consumo Aparente ⁽⁵⁾		(t)	863.026,73	1.042.782	991.316
		(10 ³ US\$ FOB)	581.070,19	734.303,76	745.618,40
	Rochas ornam. e de revestimento	(t)	5.422.000	5.991.000	6.206.000
	Importação - Mármore em bruto	(US\$ FOB / t)	439,80	494,00	545,70
Preço Médio	"Granitos" em bruto	(US\$ FOB / t)	561,50	852,90	539,70
	Rochas processadas	(US\$ FOB / t)	571,60	581,20	672,20
	Exportação - Mármore em bruto	(US\$ FOB / t)	158,60	300,60	409,40
	"Granitos" em bruto	(US\$ FOB / t)	176,70	187,40	211,10
	Rochas processadas	(US\$ FOB / t)	673,30	704,20	752,10

Fonte: MDIC/ SECEX; DNPM/DIPLAM

(1) Produção (não oficial) estimada pela Abirochas; (2) em mármore brutos incluem-se as NCMs 25151100, 25151210, 25151220 e 25152000; (3) em granitos brutos incluem-se as NCMs 25062000, 25161100, 25161200, 25162000, 25169000; (4) nas rochas processadas, incluem-se as NCMs 25140000, 68030000, 68010000, 25261000, 68022900, 68022300, 68029390, 68021000, 68029100, 68029200, 68029990; (5) estimado pelo cálculo [(produção + importação) - exportação]; (r) revisado; (p) preliminar.

Fonte: DNPM (2012) – Sumário Mineral 2011.

Diversas jazidas de quartzito foliado estão sendo regularizadas no Brasil, principalmente na região Nordeste, impactando na elevação das vendas internas e externas dessa rocha ornamental. No caso dos granitos, citamos a retomada de projetos em novas áreas produtoras. Os projetos de aproveitamento de rejeitos oriundos da extração e do beneficiamento de rochas ornamentais encontram cada vez mais aplicações em outras cadeias produtivas, contribuindo para a redução dos impactos ambientais. A elevação das importações de “*silestones*” (rochas artificiais) já viabiliza a realização de estudos visando à fabricação destes produtos no Brasil, reduzindo as importações e conquistar novos mercados no exterior (DNPM-2012).

As exportações de rochas pelo Espírito Santo atingiram US\$ 708,5 milhões (cerca de 70% do Brasil, em valor), refletindo a estrutura de logística e modernização do parque de beneficiamento existente. O tema da sustentabilidade vai se incorporando às empresas legalizadas do setor, sendo mais um fator de competitividade nas vendas.

No setor externo observou-se, ainda, uma recuperação do mercado norte-americano e mais uma queda no mercado europeu com as crises da Grécia, Espanha, Irlanda e de outros países da zona do Euro. Esta crise acirra a imposição de medidas protecionistas e de barreiras não tarifárias. Este cenário de crise pode alterar o fluxo de capital para determinados países e provocar alteração na taxa de câmbio do dólar vigente no Brasil, aumentando a competitividade das rochas ornamentais brasileiras.

CAPÍTULO III - ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE DAS ROCHAS

3.1. CONCEITO DE ALTERAÇÃO

Existem vários termos na literatura técnica que designam as modificações sofridas pelas rochas devido à ação dos agentes do meio ambiente exógeno. O termo mais difundido é “intemperismo”, que representa o conjunto de processos que ocasionam a desintegração e a decomposição das rochas e dos minerais, provocados pelos agentes atmosféricos (físicos e químicos) e biológicos (Leinz e Mendez, 1963).

Por desintegração, entende-se o intemperismo por agentes físicos e por decomposição, a dissolução através de agentes químicos. A desintegração consiste na perda de coesão da rocha e na progressiva individualização dos minerais constituintes, sem que ocorra, necessariamente, a modificação da natureza dos minerais. Em contraposição, a decomposição corresponde à modificação progressiva da natureza dos minerais sem, necessariamente, ocorrer desintegração. Além do intemperismo, a desagregação é, também, importante fator de modificações das rochas, sendo o mecanismo pelo qual ocorre a redução da resistência mecânica e o aumento da produção de finos. Este mecanismo envolve processos físicos e/ou químicos.

Outros termos, como: degradação, arenização e pulverização, também são utilizados para definir específicas modificações das rochas devido a agentes exógenos. O termo alteração é igualmente utilizado para designar modificações físicas e químicas das rochas. Neste caso, tais modificações provocam mudanças no desempenho destes produtos, principalmente do ponto de vista geomecânico (Frazão, 1993). Para fazer referência às diferentes intensidades com que as modificações ocorrem, adotam-se os termos: grau de alteração ou estado de alteração da rocha.

A maior ou menor susceptibilidade da rocha à alteração é definida pela alterabilidade do material que, por sua vez, depende principalmente da estabilidade química dos minerais constituintes da rocha. Como exemplo, destaca-se a maior alterabilidade de rochas basálticas em relação às graníticas. Este fato se deve à menor estabilidade

química dos minerais essenciais do basalto (plagioclásio e piroxênios) em relação aos do granito (quartzo, ortoclásio e biotita), considerando-se idênticas condições físico-químicas de alteração.

O conceito de alterabilidade relativa foi inicialmente depreendido a partir de pesquisas de Bowen (1928), que definiu sequências de cristalização, conforme diferentes condições de pressão e temperatura na crosta Terrestre. Goldich (1938) reformou estes estudos, no sentido da previsão da vulnerabilidade à alteração supergênica destes minerais. Os primeiros minerais a se formarem são os menos estáveis nas condições de alteração da superfície terrestre, como a olivina e o plagioclásio cálcico. Os últimos minerais a se formarem na diferenciação como, por exemplo, o quartzo, são os mais estáveis nas condições vigentes na superfície do globo terrestre.

Baseado nas séries de Goldich (*op. cit*) e de Bowen (*op. cit*), e no conhecimento peculiar dos principais minerais silicatados, Minette (1982) apresentou uma seqüência de rochas, em função da susceptibilidade à alteração dos minerais constituintes e, conseqüentemente, a alterabilidade relativa das rochas (Figura 3.1).

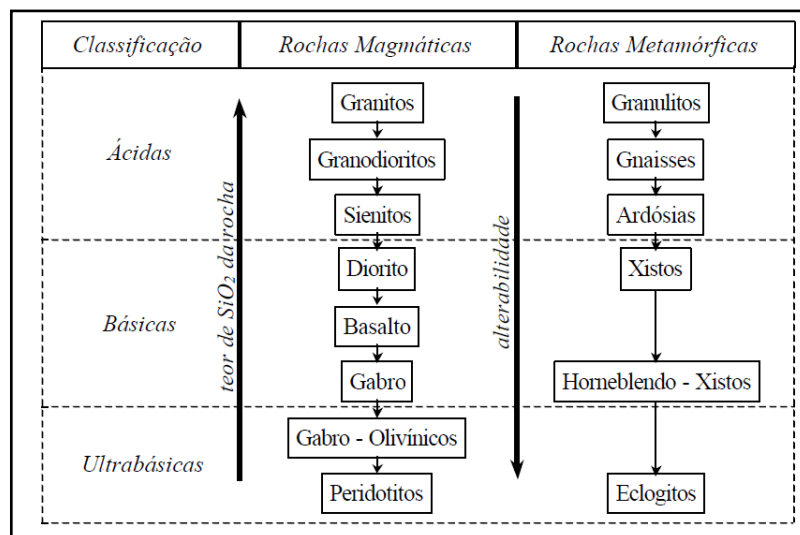


Figura 3.1 Ordem de alteração química das rochas (com inclusão do basalto), conforme conceitos de Minette (1982)

3.2 FENÔMENOS DA ALTERAÇÃO

O fenômeno da alteração de rochas depende de fatores intrínsecos e extrínsecos. Os intrínsecos são relativos à natureza da rocha, isto é, à sua composição mineralógica, características químicas e estado de microfissuramento. Os extrínsecos são relativos ao meio ambiente, ou seja, às condições climáticas. Barros (1971) sugere que a alteração de uma rocha seja função, também, do seu tempo de exposição.

Os fatores intrínsecos e os extrínsecos atuam como promotores da alteração transcorrente em um determinado período de tempo. Os fatores intrínsecos estão relacionados com a natureza mineralógica da rocha e sua superfície exposta às reações de alteração. Os fatores extrínsecos são a temperatura, o potencial hidrogeniônico, o potencial de oxidoredução, a quantidade de água disponível e as forças provocadas por agentes biológicos.

3.3 MECANISMOS DE ALTERAÇÃO

Os mecanismos de alteração ocorrem de modo gradativo. Através deles, as rochas e seus minerais constituintes reagem ao meio exógeno onde se encontram, transformando e originando produtos de alteração estáveis nas novas condições de temperatura e pressão (Minette, 1982). Os mecanismos de alteração são atribuídos a processos físicos ou processos químicos. Podem ainda ser considerados os processos gerados por agentes biológicos, que são consequência de processos químicos e físicos, e não são fundamentalmente diferentes dos anteriormente citados (Ollier, 1979). Estes processos ocorrem devido à ação dos agentes ambientais de alteração. Na evolução da alteração da rocha, tais processos ocorrem simultaneamente. No entanto, ambientalmente, qualquer um destes processos pode se impor ao outro.

3.3.1 Química

As reações químicas que podem provocar a alteração da rocha ocorrem, preferencialmente, em meios úmidos. Os principais mecanismos de alteração de natureza química são:

- Hidrólise: causada pela reação, em meio aquoso, entre os íons H^+ e OH^- da água e os íons ou elementos dos minerais da rocha. A entrada destes íons na rede cristalina dos minerais provoca a retirada de outros íons como, por exemplo: Na^+ , K^+ e Ca^{2+} , no caso de minerais silicatados. Assim, a depleção de íons causa o desgaste da rocha e, eventualmente, a abertura de fissuras pela expansão dos minerais. Este mecanismo implica no enfraquecimento progressivo da estrutura do mineral e, conseqüentemente, da rocha;
- Hidratação: é a adição de água ao mineral. Trata-se de uma reação exotérmica e envolve consideráveis variações de volume dos minerais. A variação de volume dos minerais pode causar a desintegração da rocha;
- Solubilização: é um mecanismo correspondente à perda dos minerais constituintes da rocha para água. Este processo é função das características físicas e químicas do meio aquoso;
- Oxido redução: é a reação dos minerais da rocha com o oxigênio. Os produtos da oxido redução são óxidos e hidróxidos, que constituem elementos de fácil lixiviação;
- Carbonatação: é a reação dos íons CO_3 ou HCO_3 com os minerais da rocha. Os produtos da carbonatação são os carbonatos de fácil lixiviação;
- Complexação: corresponde a uma reação onde ocorre forte ligação entre um íon, normalmente um metal, e a estrutura anelar do composto químico dos agentes da complexação. Seus principais agentes são a matéria orgânica e o húmus.

3.3.2 Física

A alteração física da rocha é caracterizada pela fragmentação em virtude de agentes mecânicos, sem que ocorra variação química. Espera-se que a alteração física seja marcante nas regiões onde a umidade é muito baixa. Os principais mecanismos de alteração física são:

- Fraturamento por alívio de tensões: a descompressão pode provocar a microfissuração e o desenvolvimento de fraturas nas rochas. Este alívio de tensões pode ser causado por diversos fatores, como por exemplo, escavações subterrâneas, cortes de grandes taludes, erosão de extratos superficiais, etc.;
- Expansão devido a efeitos térmicos (insolação): a variação da amplitude térmica diuturna gera a expansão e a contração da rocha. Tendo em vista que estas são constituídas por diferentes minerais com distintos coeficientes de dilatação, a expansão e a contração destes minerais podem causar o desenvolvimento de tensões, que podem gerar microfissuras e, posteriormente, a desagregação da rocha;
- Abrasão: é provocada pelo atrito ou impacto entre partículas. Este mecanismo causa o desgaste da rocha;
- Desagregação por crescimento de cristais: o crescimento de cristais no interior da rocha pode ser provocado principalmente por três fatores: o congelamento da água, a cristalização de sais e as alterações químicas com expansão. A variação de volume, ocasionada pelo crescimento de cristais no interior da rocha, gera tensões que podem causar fraturamentos.

3.4 AGENTES DE ALTERAÇÃO

Os principais agentes de alteração das rochas são de ordem climática. Ambiente climático é o conjunto de fatores que caracteriza o estado médio da atmosfera, da hidrosfera e da biosfera do meio ambiente. Os principais fatores são: temperatura,

precipitação, umidade relativa do ar, vento, água, pressão atmosférica, potencial hidrogeniônico e potencial de oxidoredução. Além destes, Jenny (1941) destaca ainda a importância das condições da topografia nos mecanismos de alteração. Observam-se aqui dois grandes grupos de processos de alteração, que são: aqueles de ocorrência natural (a ação da água, variação de temperatura, ação dos organismos vivos, etc); e aqueles processos desencadeados pela ação antrópica, relacionados às alterações físicas provocadas pelo Homem, e as ações provocadas pelos agentes químicos atmosféricos, agentes químicos empregados na limpeza e manutenção do material rochoso, e agentes químicos gerados na poluição industrial e urbana.

3.4.1 Água

Dentre os agentes capazes de provocar processos de alterações nos materiais pétreos, a água é sem dúvida um dos mais importantes, estando associada à maior parte dos processos de deterioração, e podendo atuar através de mecanismos físicos e químicos ou, na maioria das vezes, de ambos. A água é o meio que carrega os agentes químicos capazes de reagirem com os componentes minerais das rochas promovendo a sua alteração. Os fenômenos de evaporação de soluções carregadoras de eletrólitos dissolvidos como sais de sódio, potássio entre outros, formação de nevoeiros, condensação de umidade atmosférica, processo de congelamento e de degelo, e saturação, são todos, na realidade, fenômenos em que a água encontra-se diretamente envolvida.

No estado líquido a água infiltra-se através dos poros e fraturas do material rochoso penetrando-o de fora para dentro, podendo provocar a dissolução de certos minerais aí presentes. Por outro lado a água existente no solo pode subir por capilaridade para o interior do material rochoso carregando consigo sólidos dissolvidos. Nesta forma de solução, a água líquida carrega para o interior do corpo rochoso eletrólitos que podem vir a reagir como os minerais constituintes da rocha, funcionando como meio de contato entre os agentes químicos de alteração e a rocha. Também podem provocar o aumento de tensões internas devido à evaporação do solvente água, promovendo a concentração da solução de modo a torná-la supersaturada; neste

momento, o coeficiente de solubilidade da solução foi ultrapassado, e haverá a formação de cristais no material pétreo.

Quando a cristalização dos sais ocorre na superfície do material pétreo este processo denomina-se de eflorescência; no entanto, quando a cristalização se dá no interior do material, este processo se chama criptoflorescência.

As eflorescências formam-se, em geral, quando a evaporação do solvente se faz com certa lentidão. A simples exposição de sais cristalizados mais solúveis, à ação da chuva, pode levar a seu desaparecimento por dissolução ou mesmo por remoção. Nestes casos a ação dos sais cristalizados é menos efetiva sobre o material. Entretanto, quando o processo de cristalização dos sais ocorre no interior do material rochoso sua ação é bem mais efetiva e desagregadora sobre a rocha, uma vez que as variações de condições físicas do meio levam a processos como dissolução, expansão e retração dos sais que assim provocam elevação das tensões internas do material rochoso, com conseqüente possibilidade de desagregação.

Quanto à origem dos sais, estes podem ter origem interna ou externa; assim, podem ser encontrados presentes no material pétreo antes mesmo de sua aplicação como revestimento e ou adorno, mas também podem se originar a partir da alteração dos minerais que constituem a rocha. Originam-se também a partir de pontos externos, tais como materiais de rejunte ou da alvenaria de base, quando o material rochoso é utilizado como revestimento do solo, ou ainda advindo da atmosfera ou de produtos utilizados na limpeza e conservação do material rochoso.

Cristais formados a partir de sólidos que se encontravam dissolvidos na água podem gerar tensões internas e provocam a desagregação do material rochoso que, por vezes, se destacam em lascas de dimensões consideráveis e se cobrem de eflorescências. O crescimento de cristais dentro da estrutura pétrea deve-se à penetração de agentes externos nos vazios pré-existentes, cristalizando-se e se expandindo, gerando, portanto, tensões que desagregam a estrutura existente. Para Ollier (1984), o crescimento de cristais de sais provenientes da evaporação da solução percolante pode, em algumas circunstâncias, causar desagregação da

rocha. Cooke e Smalley (*apud* Ollier 1984) ressaltam que o crescimento de sal em espaço confinado pode causar estresse por expansão termal ou hidratação.

A água na forma sólida (gelo) pode provocar a ruptura e desagregação do material rochoso devido à sua expansão. Os ciclos de gelo e degelo levam a água a gerar tensões internas capazes de promover a desagregação do material pétreo. Na fase de degelo a água se encontra na forma líquida podendo assim infiltrar-se pelos poros e fraturas do material rochoso. Na fase de gelo esta água se solidifica provocando o aumento de tensões internas no material. Além destes fatos, a presença de material expansivo como, por exemplo, argilas presentes no corpo rochoso, podem levar ao aumento de tensões internas no material devido aos ciclos de molhagem e secagem a que o corpo rochoso está submetido. A elevação de tais tensões internas provoca desagregação do material em razão da geração de fissuras microscópicas, ou mesmo macroscópicas, no interior do corpo rochoso.

Sob a forma de solução, a água também é responsável por diversas reações químicas, dentre estas destacamos as reações de óxido-redução. Estas reações se desenvolvem quando o material rochoso apresenta em sua constituição, minerais metálicos que possuam mais de um estado de oxidação possível, e se encontram no estado menos oxidado, como é o caso dos sulfetos metálicos. De acordo com Petrucci (1998), um dos principais processos de óxido-redução é aquele que envolve a oxidação de sulfetos encontrados nos materiais rochosos sob a forma de pirita (FeS_2), pirrotita ($\text{Fe}_{n-1}\text{S}_n$) e marcassita (FeS_2). Estes minerais contendo ferro encontram-se sob a forma de sulfetos, e deste modo apresentam o íon metálico ferro no seu estado de oxidação menor: $2+$. Em presença do ar e da água o ferro será oxidado e passará a apresentar estado de oxidação mais elevado, passando para a valência $3+$.

3.4.2 Vento

Um dos fatores de alteração do material pétreo é o vento, o qual está estreitamente relacionado com o clima. Dependendo do clima, o vento pode transportar tanto particulados em suspensão como aerossóis. Deste modo, as ações tanto físicas quanto químicas podem estar presentes. Em climas secos a ação mais efetiva do vento torna-se mecânica devido ao choque do material particulado, transportado por

este, contra as rochas. A grande capacidade erosiva do vento carreando material particulado provoca, em muitos materiais rochosos, cavidades características que podem atingir profundidades apreciáveis o que se define como corrosão eólica. Em regiões mais úmidas temos os processos de alteração tanto físico como químico ocorrendo simultaneamente, de modo que, em regiões mais úmidas, a ação química é também significativa uma vez que os aerossóis transportados podem ser ricos de eletrólitos dissolvidos nas pequenas gotículas de aerossol. Pode-se observar este fato de forma mais acentuada nos ambientes costeiros onde, além de particulados como areia, aerossóis são constantemente formados e carregados para a costa pela ação do vento.

Particulados químicos finíssimos como NO_2 , SO_2 , provenientes da poluição atmosférica podem também ser transportados sob esta forma (Baird, 2005). Uma vez depositados, estes materiais reativos aguardam hidratação para gerarem ácidos fortes que rapidamente se ionizam e reagem com o material rochoso. O vento também influencia na cristalização dos sais dissolvidos e carregados na forma de aerossóis. À medida que o material é depositado sobre o corpo rochoso, as gotículas do aerossol se fundem dando origem a gotas maiores que penetram no material rochoso através de poros, fendas e fraturas.

3.4.3 Temperatura

A ação da temperatura sob os processos de alteração de corpos rochosos se dá tanto por processos físicos como químicos. Nos processos físicos observamos que as variações de temperatura levam o corpo rochoso, de composição heterogênea, a apresentar diferentes coeficientes de dilatação/contração, para os seus diferentes constituintes. Estas diferenças provocam variações de volumes que terminam por fissurar o corpo rochoso levando assim à sua desagregação. Em geral a temperatura não se distribui uniformemente sobre toda a espessura do corpo, o que contribui ainda mais para susceptibilidade de rupturas, fissuras e esfoliações no corpo rochoso.

Os ciclos de gelo e degelo a que os corpos rochosos estão submetidos, também provocam rupturas e fraturas. A água na forma líquida penetra nos poros, fendas e fraturas já existentes e ao se solidificar com a diminuição da temperatura aumenta de volume, e ao se expandir provoca a desagregação e fissuração da rocha.

A variação de temperatura também atua de forma contundente sobre os processos químicos uma vez que a elevação de temperatura acarreta aumento de velocidade das reações.

3.4.4 Agentes Biológicos

Aires-Barros (2001) assinala que os agentes biológicos capazes de promoverem alterações nas rochas pertencem a várias categorias, assim temos: algas e líquens, bactérias, protozoários, fungos, plantas e animais. Estes organismos tanto podem encontrar-se na superfície do material pétreo como no seio destes. Os agentes biológicos atuam através de ações químicas diretas (biocorrosão) ou de forma indireta como catalisadores de reações de hidrólise, sulfatação entre outras, podendo ainda atuar sobre o material rochoso através de processos físicos como bioabrasão e desagregação.

Segundo Aires-Barros (2001) pode-se dividir a biota em químico-litotrófica e químico-organo-heterotrófica, onde as primeiras são produtoras de H_2SO_4 e HNO_3 , enquanto as segundas geram H_2CO_3 e ácidos orgânicos. Assim, estes agentes biológicos traduzem suas ações por diversos processos, sendo a biocorrosão química provocada por depósitos de dejetos de animais o mais significativo dentre eles. Os excrementos de aves e morcegos contendo nitratos podem deteriorar a rocha, uma vez que fornecem substrato para ação microbiológica que produzirá ácidos capazes de reagirem com o material pétreo.

Alterações de materiais rochosos pela ação de agentes biológicos, também ocorrem através de processos físicos. A ação de árvores e vegetação parasita tem importância sobre a deterioração tanto de monumentos como sobre construções de pedra, em geral, quando estas se desenvolvem na superfície ou sob o corpo rochoso, nutrindo-se, por vezes, de sais e matéria orgânica que extraem do material a que se fixam. A ação das raízes do vegetal pode provocar a desagregação do material pétreo sob o qual estão fixadas.

A ação de microorganismos também é notada sobre o material pétreo. A presença de algas e de organismos com elas aparentados está associada a ambientes que apresentam elevada umidade. Os ciclos de umidificações e secagens acarretam a desagregação do material pétreo por meios físicos, embora que estes

microorganismos também contribuam para a deterioração química do material, principalmente nos climas tropicais.

As rochas silicáticas que contenham uma população de bactérias têm tendência em se desagregar, embora de forma lenta inicialmente, sendo o processo significativamente acelerado ao final de determinado tempo de exposição. Esta ação bacteriana atua no seio das microfissuras e a partir de reações de óxido-redução incidem diretamente sobre os minerais constituintes das rochas, ataca os silicatos, carbonatos e óxidos, constituintes do material pétreo (Aires-Barros, 2001).

3.4.5 Poluentes Atmosféricos

Nossa atmosfera corresponde a um cinturão gasoso que envolve todo 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. Estas porções distintas de nossa atmosfera apresentam composições químicas diferentes, com a predominância de determinados gases sobre a outra, e onde em cada uma delas se desenvolvem reações químicas específicas e importantes para a manutenção da vida em nosso planeta.

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.

Para Baird (2002), uma das principais características da atmosfera de nosso planeta é que ela é um ambiente oxidante, fenômeno que se explica pela presença de altas concentrações de oxigênio diatômico (O_2). De modo que quase todos os gases liberados no ar, sejam eles substâncias poluentes ou naturais, são totalmente oxidados e seus produtos finais, ao longo do tempo, são depositados na superfície da Terra. Este mecanismo seria, portanto responsável pela limpeza do ar.

Entretanto, o equilíbrio desta fase gasosa vem sendo constantemente ameaçado e sua composição química vem sendo gradativamente alterada pelo grande quantitativo de substâncias químicas antropicamente liberadas diretamente na atmosfera. Estas substâncias, na maior parte dos casos provenientes das atividades denominadas de “produtivas” desenvolvidas pelo Homem, vêm comprometendo a integridade de todo o sistema gasoso do planeta. Novos gases, material particulado, além de finos aerossóis têm sido constantemente liberados em nossa atmosfera, alterando a sua composição e desencadeando reações e formação de novos compostos que são capazes de provocar danos ao planeta como um todo, ao próprio Homem, e às estruturas construídas por estes.

Para Aires-Barros (2001), contaminação atmosférica corresponde à presença no ar de substâncias ou formas de energia que alteram a qualidade do ar, de modo a provocar riscos graves para as pessoas, animais ou plantas, assim como para os bens imóveis de qualquer natureza.

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 COVs (compostos orgânicos voláteis) pelos vegetais presentes nas florestas, as erupções vulcânicas, fonte de H_2S , e SO_2 , e a presença de NO_2 advinda da oxidação do material vegetal que contém nitrogênio, além dos incêndios florestais.

As emissões antrópicas de poluentes para atmosfera são, principalmente, a queima de combustíveis fósseis e o crescimento industrial. Destas principais fontes poluidoras o crescimento industrial é, de longe, o mais nefasto, devido ao número de focos, ao volume de suas emissões e às características e teor dos contaminantes (Aires-Barros, 1991, 2001; Baird, 2002; Dionísio *et al.*, 2004).

Dentre os agentes poluentes que mais tem desencadeado agressões aos materiais rochosos destacamos os gases CO, CO_2 , SO_2 , e NO e NO_2 , compostos orgânicos voláteis (COVs), ozônio produzido pelo smog fotoquímico, além de aerossóis

contendo H_2SO_4 , NH_4HSO_4 , NaCl , HNO_3 , HCl , ácidos orgânicos, e material particulado sólido.

O monóxido de carbono, um gás inodoro e incolor, se origina 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, esta é a ação antrópica mais contundente, devido à grande concentração de monóxido de carbono lançada na atmosfera a partir da combustão incompleta de combustíveis fósseis. Esta alta concentração de CO resulta do mau funcionamento e baixo rendimento dos aparelhos de combustão industrialmente desenvolvidos.

Segundo Baird (2002), o CO é gradativamente oxidado no ar passando a dióxido de carbono CO_2 através de mecanismo complexo que envolve a sua reação com os radicais $\text{OH}^\cdot$, e não por sua oxidação direta com o oxigênio diatômico. Portanto a sua oxidação envolve a disponibilidade de radicais livres $\text{OH}^\cdot$ que se originam a partir da decomposição fotoquímica de traços de ozônio que produzem átomos de oxigênio no estado excitado. Estes por sua vez reagem com o vapor de água gerando os radicais livres $\text{OH}^\cdot$.

A intensidade de atuação dos agentes de alteração sobre as rochas varia de acordo com o ambiente climático. Todavia, pode-se estabelecer uma correlação entre o tipo de alteração e alguns dos agentes de alteração (Peltier, 1950). Na Figura 3.2 foi estabelecida uma correlação entre a temperatura média anual, a precipitação média anual, e os prováveis tipos e intensidade de alteração.

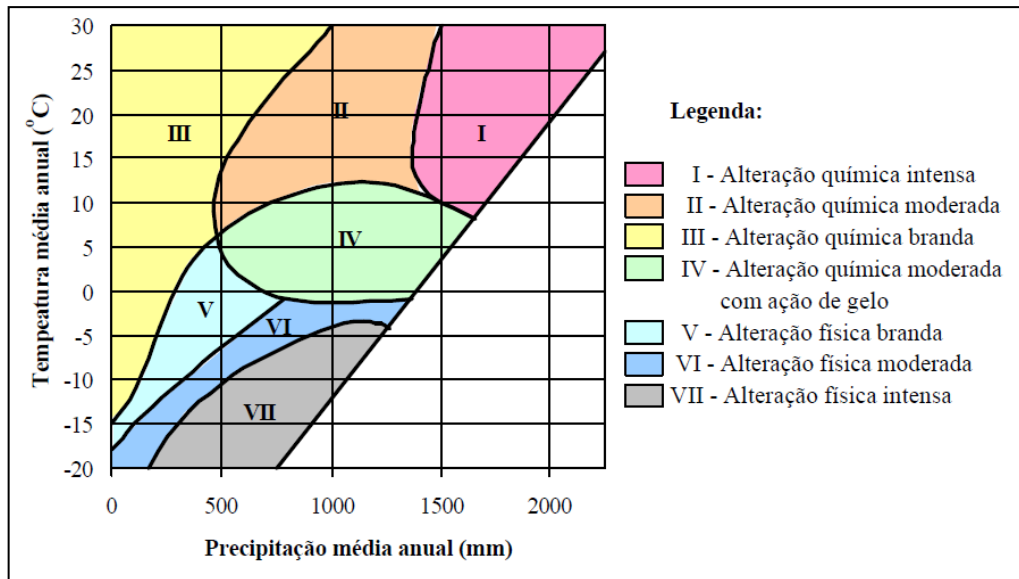


Figura 3.2 Tipos de alteração em função da temperatura e da precipitação (Peltier, 1950).

3.5 AVALIAÇÃO DA ALTERABILIDADE DE MATERIAIS ROCHOSOS

3.5.1 Alterabilidade das Rochas

A utilização de rochas como material de construção é prática corrente desde princípios de nossa civilização. A observação das modificações das características das rochas, em virtude de sua exposição aos agentes do meio ambiente (atmosféricos e biológicos), também não constitui fato novo. As primeiras considerações gerais sobre alteração de rochas e consequentes implicações são datadas do início do século XIX na França, por J. Fournet. No entanto, na Engenharia Civil, as transformações da rocha pelos agentes do meio ambiente só foram abordadas sistematicamente há poucas décadas (Farjallat, 1972). De fato, a avaliação da alterabilidade das rochas, antes destes estudos, seguia critérios baseados em ensaios não padronizados. Deste modo, a avaliação da qualidade da rocha para uso na construção era resultado unicamente da experiência e da sensibilidade dos construtores e projetistas.

Aires-Barros (2001) define alterabilidade de rochas como um conceito dinâmico que se refere à aptidão de uma rocha em se alterar, em função do tempo. Esse tempo, considerado na alteração intempérica como geológico é, na alterabilidade, considerado um tempo em escala humana, ou seja, os fenômenos se sucedem à

aplicação do produto, na escala de tempo histórico, na escala do Homem e suas obras de engenharia.

A susceptibilidade do material pétreo à alteração depende tanto de fatores intrínsecos como de fatores extrínsecos. As principais características físico-mecânicas e de alterabilidade dos corpos rochosos estão intimamente ligadas a estas características de modo que fatores intrínsecos tais como: heterogeneidade, textura, composição química e mineralógica, permeabilidade, porosidade, presença de tensões confinadas, de microfissuras, de planos de fraquezas, dimensão média dos grãos; assim como fatores extrínsecos intensidade e tempo de duração de agentes naturais externos e/ou internos, processo de extração e beneficiamento, como serragem, polimento e brilho, influenciam na resistência e na alterabilidade do material; podendo ocasionar ou amplificar microfissuras pré-existentes (Aires-Barros, 2001).

A determinação do estado da alteração de uma rocha tem sido usualmente realizada de maneira empírica, através de métodos quantitativos não padronizados, fornecendo resultados subjetivos e nem sempre corretos. Vários autores têm apresentado procedimentos de ensaios para permitir uma avaliação mais objetiva da alterabilidade das rochas. A Tabela 3.1 apresenta uma revisão dos diversos procedimentos encontrados na literatura.

Tabela 3.1 Métodos para avaliação da alteração e alterabilidade de rochas.

Referências	Métodos Sugeridos	Crítérios de avaliação do estado de alteração ou de alterabilidade
Rego e Santos (1938)	Porosidade aparente	Para um mesmo tipo petrográfico: maior porosidade, maior grau de alteração
Pichler (1942)	Petrografia e absorção d'água	Se a petrografia indicar minerais alterados e a absorção for maior que 0,5%, a rocha deve ser rejeitada
Day (1962)	Petrografia (basaltos), ensaio Deval modificado e granulometria dos finos	Teores de minerais alterados e variação da granulometria em relação à amostra original
Hamrol (1962)	Absorção d'água e índice de vazios	Relação entre variação de absorção e do índice de vazios, para o tempo considerado
Weinert (1964 e 1968)	Relação da evapotranspiração do mês de maior pluviosidade com a precipitação anual e petrografia	Índice climático N relacionado com a porcentagem de minerais secundários para qualificar o estado de alteração dos materiais e definir seu uso para sub-base, base e camada betuminosa de rodovias
Farran e Thénoz (1965)	Permeabilidade ao ar e superfície específica	Para permeabilidade > 0,1 m/s, a alterabilidade cresce com o aumento da superfície específica
Iliev (1966)	Velocidade de propagação de ultra-som	Índice que relaciona velocidade de ultra-som da rocha fresca e da rocha alterada
Mendes <i>et al.</i> (1966) e Barros (1969)	Análise petrográfica microscópica modal e ensaios mecânicos	Índice de alteração obtido pela relação entre o teor de minerais sãos e a soma dos teores de minerais alterados e de vazios relacionado com o módulo de deformação ou tensão de ruptura na compressão
Talobre em 1967 (citado em Yoshida, 1972)	Sanidade de amostras em pó e em corpos de prova ao H ₂ SO ₄	Perdas em massa não devem ultrapassar 18% para amostra em pó e 100mg para os corpos de prova
Schneider e Rocha (1968)	Análise petrográfica (basaltos)	Teores em minerais secundários e em argilominerais, expansivos e não-expansivos, permitem avaliar estado de alteração e indicar a necessidade ou não de ensaios adicionais para material em rodovias
Krauskopf (citado em Loughnan, 1969)	Análise química	Índice que relaciona os teores em óxidos alcalino e alcalino terrosos e a soma destes com os de Si, Al e Fe
Struillou (1969)	Imersão de fragmentos de rocha de 10-20mm em H ₂ O ₂ /110 vol.	Comparação da porcentagem de material passante na malha de abertura 8mm com aquela apresentada por material de desempenho conhecido
HRB (1970)	Ensaio de abrasão modificado conjugado à compactação	Comparação entre granulometria, limites de Atterberg e equivalente de areia para material ensaiado e o material original
Farjallat (1971)	Ensaio de alteração por lixiviação em extrator Soxhlet associado a ensaio de abrasão Los Angeles	Índice de alterabilidade definido pela relação entre porcentagem de material desagregado no ensaio de alteração, com a porcentagem de perdas por abrasão.
Rocha (1971)	Lixiviação contínua em extrator Soxhlet em amostras moídas	Perdas de massa para tempos preestabelecidos de alteração no laboratório
Scott (citado em Farjallat 1971)	Análise petrográfica (basaltos)	Teor em minerais secundários superior a 20% sugere que a rocha não deve ser específica para uso na construção civil
Yoshida (1972)	Ensaio de impacto Treton associado a diferentes ensaios de alteração no laboratório	Índices de alteração obtidos pela comparação entre os resultados dos ensaios de impacto da rocha alterada e da sã
Wylde (1980,1982)	Determinação de um fator de textura a nível petrográfico	Avaliação da desagregação de basaltos usados como base de pavimentos através da observação das ligações entre partículas
Ladeira e Minette (1984)	Ensaio de resistência e de deformabilidade	Índices de alteração obtidos pela comparação entre os resultados dos ensaios mecânicos da rocha alterada e da sã

In: www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/2075/2075_2.PDF

Uma evolução na análise da quantificação da alterabilidade de rochas é representada pela associação das características dos materiais a índices de qualidade que comparam estas características em diferentes graus de alteração (Farjallat, 1972). Minette (1982) sugeriu uma aplicação deste tipo de análise para quantificar a alterabilidade de um diorito, tendo em vista a avaliação do comportamento geomecânico do material. Os índices de qualidade são aplicados na quantificação específica de propriedades mensuráveis como resistência, porosidade, desgaste abrasivo e outras. A aplicação destes índices mostra bons resultados na avaliação da qualidade das rochas, considerando projetos ou objetivos específicos.

Tais índices foram desenvolvidos para materiais rochosos por diversos pesquisadores com base em análises e ensaios de rotina laboratorial.

3.5.2 Índices Geoquímicos

Na alteração geoquímica, o processo se inicia devido às transformações que ocorrem nos minerais, provocadas pela exposição da rocha ao meio ambiente. As características típicas deste tipo de alteração manifestam-se na textura e na estrutura da rocha. Ressalta-se que seu produto final resulta na formação de solos residuais. Os índices geoquímicos são baseados na comparação entre a composição química da rocha nos vários estágios de alteração a partir do seu estado inicial. A Tabela 3.2 apresenta algumas das proposições de índices geoquímicos, cuja utilização é limitada pela falta de dados disponíveis na literatura.

Tabela 3.2 Índices geoquímicos para avaliação da alterabilidade de rochas.

Referência	Princípio básico	Índice de qualidade
Reiche (1945)	Comprovação experimental da perda de minerais da rocha. A primeira equação representa o índice de alteração potencial da rocha	$I = \frac{\text{moles } (CaO + Na_2O + MgO + K_2O - H_2O)}{\text{moles } \left(\begin{array}{l} SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + Cr_2O_3 \\ + CaO + Na_2O + MgO + K_2O - H_2O \end{array} \right)} \times 100\%$ $I = \frac{SiO_2}{SiO_2 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + M_2O_3} \times 100\%$
Barth (1948)	Diferença na quantidade de ions entre as células padrões da rocha intacta e da alterada. A célula padrão é aquela que possui 160 ions de oxigênio	$I = (\text{número de ions da célula padrão da rocha intacta}) - (\text{número de ions da célula padrão da rocha alterada})$
Barth (1948) associado a teoria de Keller (1968)	Considera que a quantidade de alumínio permanece inalterada durante a alteração.	$I = (\text{número de ions da célula padrão da rocha intacta}) - (\text{número de ions da célula padrão da rocha alterada considerando Al constante})$
Short (1961)	Relação entre os índices potenciais de alteração da rocha alterada e a intacta, propostos por Reiche (1950)	$I = \frac{\text{índice potencial de alteração da rocha alterada}}{\text{índice potencial de alteração da rocha intacta}}$
Ruxton (1968)	Perda de sílica e de cátions solúveis e adição de H ₂ O com peso constante de alumínio	$I = \frac{\text{moles de } SiO_2}{\text{moles de } Al_2O_3}$
Ruxton (1968) e Barros (1979, 1971)	Relação entre a quantidade de diferentes elementos	$I = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$ ou $I = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO}$
Parker (1970)	Mobilização dos álcalis em função da sua força de ligação com o oxigênio	$I = \left(\frac{Na}{Na-O} + \frac{K}{K-O} + \frac{Mg}{Mg-O} + \frac{Ca}{Ca-O} \right) \times 100\%$ O numerador de cada parcela da soma é a porcentagem molecular do elemento dividido pelo peso atômico do respectivo elemento. O denominador é a força de ligação do álcali ao oxigênio.
Barros (1971, 1979)	Oxidação do Fe ⁺² e do Fe ⁺³	$I = \frac{2 Fe_2O_3}{2 Fe_2O_3 + FeO}$

In: www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/2075/2075_2.PDF

3.5.3 Índices Petrográficos

A análise petrográfica da alteração das rochas pode ser feita macroscopicamente e microscopicamente. A primeira é baseada em informações visuais e, deste modo, não deve ser considerada como indicador quantitativo da alteração da rocha. A partir de uma análise microscópica, podem-se quantificar os minerais são e alterados, avaliar o estado das microfissuras e quantificar o teor de minerais secundários. Entretanto, deve-se ressaltar que o grau de alterabilidade pode ser um critério que, dependendo da apreciação e experiência do analista, pode ter aspectos subjetivos.

Após o estudo pioneiro de Lord (1916), vários trabalhos apresentaram grande quantidade de índices de qualidade baseados em informações petrográficas. A Tabela 3.3 mostra um resumo dos itens considerados relevantes. Estes índices buscam, de modo geral, representar a alterabilidade do material em função da presença de minerais secundários, microfissuras e vazios (porosidade) na rocha. Eventualmente, estes fatores são os que mais influenciam no processo de alteração que a rocha pode sofrer. No entanto, o comportamento do material pétreo, em especial o geomecânico, é definido também por outras características, petrográficas ou não. Assim, a utilização de correlações entre índices petrográficos e o comportamento geomecânico de materiais líticos é usualmente limitada aos casos estudados. Outra limitação da aplicação destes índices é a representatividade limitada das lâminas petrográficas.

Tabela 3.3 Índices petrográficos para avaliação da alterabilidade de rochas.

Referência	Variáveis	Índice de qualidade
Mendes <i>et al.</i> (1966)	K : índice de qualidade micropetrográfico; n : valores de X_i minerais são; m : valores de Y_j minerais alterados; P_i e P_j : coeficientes (pesos) que avaliam os efeitos da mineralogia e das fissuras nas propriedades mecânicas da rocha.	$K = \frac{\sum_{i=1}^n P_i X_i}{\sum_{j=1}^m P_j Y_j}$
İrfan e Deamam (1978)	I_P : índice de qualidade A : porcentagem de minerais primários; B : porcentagem de minerais secundários + porcentagem de vazios + porcentagem de fissuras.	$I_P = \frac{A}{B}$
Cole e Sandy (1980)	R_{sm} : índice de minerais secundários P : porcentagem de minerais secundários; M : estabilidade dos minerais secundários; TR : textura.	$R_{sm} = \sum [P, M] TR$
CRB (1982)	SMC : índice minerais secundários; S : teor de minerais secundários, de vazios e de microfissuras; M : teor de minerais (primários e secundários).	$SMC = \frac{S}{M} \times 100$
Wylde (1980, 1982)	TF : fator de textura; N : número total de pontos observados; N_i : número de pontos com classificação de finos igual a i . A escala de classificação de finos varia de 1 para fortemente ligados e 5 para fracamente ligados.	$TF = \frac{N_1 + 2N_2 + 3N_3 + 4N_4 + 5N_5}{N}$

In: www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/2075/2075_2.PDF

3.5.4 Índices Físicos

Durante o desenvolvimento da alteração da rocha, os principais efeitos observados em suas características físicas são:

- Perda de material por dissolução ou erosão interna;
- Aumento da porosidade da rocha, seguida de aumento na absorção d'água. Deve-se destacar que a porosidade é modificada somente na região do fragmento rochoso que é permeável, ou seja, no domínio da amostragem acessível à água;
- Expansão associada à absorção de água;
- Decréscimo no peso específico aparente;
- Aumento do grau de fissuração e, conseqüentemente, aumento da permeabilidade.

Desta forma, as características físicas dos materiais rochosos que são mais empregadas na avaliação da alterabilidade são: capacidade de absorção de água,

porosidade, peso específico aparente, expansibilidade e permeabilidade. Estas características são associadas, ainda, à perda de material da rocha. A variação destas características depende do meio onde se encontra o material rochoso e do estado de alteração inicial do mesmo. Algumas características podem evoluir mais que outras e, deste modo, deve-se fazer uma escolha criteriosa sobre a característica da rocha capaz de representar sua alterabilidade.

O primeiro índice físico de qualidade a ser utilizado para quantificação da alterabilidade foi a absorção (Hamrol, 1962). Outros pesquisadores (Minty e Monk, 1966; Smith *et al.*, 1970; e Baynes *et al.*, 1978) sugerem o peso específico e a absorção de água como indicadores da alterabilidade dos materiais líticos. Nascimento (1970) apresentou correlações entre a expansão de corpos de prova e o tempo de alteração natural. Farjallat (1973) mostrou a relação entre a redução do peso das amostras ensaiadas e o tempo de alteração induzida, em laboratório. Além da absorção d'água, Ladeira e Minette (1984) utilizaram as variações do peso específico aparente e da porosidade aparente, para a quantificação da alterabilidade.

De maneira geral, os índices físicos de qualidade fazem uma comparação entre uma determinada característica física do material no estado inicial de utilização (intacto) e a mesma característica no estado alterado. Desta forma, estabelece-se uma equação geral que representa o índice físico de alteração (I) do material, expressa da seguinte forma:

$$I = \frac{|x_0 - x|}{y} \times 100 \%$$

onde x_0 e x são as características físicas do material no estado intacto e alterado, respectivamente. A variável y assume o valor x_0 ou x quando a característica física analisada diminui ou aumenta, respectivamente, devido à alteração da rocha. Assim, o valor de (I) varia de zero, para o material intacto, até um valor máximo, sempre menor que 100%, para o material mais alterado.

A facilidade de determinação das características físicas e a sensibilidade destas características à alteração dos materiais rochosos permitem que os índices de qualidade baseados nas características físicas constituam boa ferramenta para avaliação da alterabilidade destes materiais.

3.6 PERDA DE BRILHO

Após a aplicação, as rochas ornamentais utilizadas como revestimento encontram-se expostas a diversas situações agressivas, como poluição atmosférica, chuvas ácidas, produtos de limpeza, sucos ácidos, vinagre, entre outras. Estas substâncias, quando em contato com as rochas, podem reagir com seus minerais constituintes promovendo modificações significativas no brilho, na coloração, e comprometer, desta forma, a estética do produto devido ao seu decaimento lítico. A determinação e monitoramento do brilho exibido pela superfície lustrada da rocha torna-se parâmetro de grande relevância, pois atua como um bom indicativo de grau de alterabilidade sofrido pela mesma.

Neste tipo de ensaio são determinados os brilhos dos corpos de prova antes e após os ciclos de imersão total em líquidos reativos, com a finalidade de monitorar sua perda nos fácies estudados após estes ciclos. Para tanto são utilizados corpos de prova de dimensões 5x5x2 cm que são, posteriormente, imersos nas respectivas soluções lixiviantes.

3.7. NORMAS E PROCEDIMENTOS PARA OS ENSAIOS

Normas e ensaios são procedimentos padronizados que tem como objetivo alcançar resultados preciosos e passíveis de comprovação sobre as características e propriedades de um material estudado. Assim, os ensaios e normas aplicados ao estudo das rochas têm como objetivo a avaliação do desempenho das mesmas perante os processos de alterabilidade, determinando assim suas possíveis aplicações sem perda de suas características principais.

No Brasil, a sistematização das normas é regida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que através das Normas Brasileiras (NBR), fixa os parâmetros. Há uma série de ensaios normatizados pela ABNT sobre o uso de rochas como material de revestimento e/ou ornamental. Estas normas são

padronização dos procedimentos de ensaio laboratorial referente à determinação das propriedades das rochas.

No entanto, para os ensaios de alterabilidade de rochas, estas normas ainda são pouco abrangentes, de modo que, para realização de ensaios ainda não normalizados pela ABNT se recorre às Normas Internacionais, como a americana ASTM – American Standard of Testing and Materials ou as européias CEN (European Committee for Standardization).

Alguns ensaios não normalizados serão empregados e seguirão método desenvolvido por entidades de pesquisa como IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo) conforme recomendado por Becerra Becerra & Costa (2007). Deste modo, no presente projeto, far-se-á uso de normas padronizadas brasileiras, européias e, em alguns casos, por procedimentos desenvolvidos pelo IPT.

Segundo Rolim Filho *et al.* (2005), as normas brasileiras NBR são baseadas nas normas americanas ASTM, que têm gerado algumas divergências acerca de alguns procedimentos de ensaios, ocorrendo ainda desacordos devido à infidelidade de resultados de ensaios acelerados quando comparados aos ensaios efetuados em tempo real. No entanto, faz-se necessário notar que estes ensaios são apenas parâmetros para a utilização da rocha, tentando avaliar a probabilidade de alteração, informando a maior ou menor probabilidade que o material sofre em função do ambiente em que será aplicado.

Uma das ferramentas básicas para avaliação da susceptibilidade preliminar do material rochoso à alteração são as informações produzidas através das análises petrográficas. De acordo com Artur *et al.* (2001) a realização destas análises para avaliação qualitativa e quantitativa das características petrográficas, relacionadas com a composição mineralógica (Me: Minerais essenciais, Mac: Minerais acessórios, Ma: Minerais de alteração), com a textura, o grau de intensidade de microfissuras intergranular (It), intragranular (Ig) e transgranular, e natureza dos contatos intergranulares, das litologias estudadas, constituem poderosa ferramenta para avaliação preliminar da susceptibilidade das litologias, quando as mesmas são utilizadas em diferentes situações, aplicando-se a norma NBR 12.768/1992, como uma das etapas iniciais deste projeto.

As lâminas para desenvolvimento do estudo petrográfico foram confeccionadas no Laboratório de Laminação da CPRM para o Preto São Francisco e as lâminas do Preto São Gabriel, São Marcos, Aracruz e Ouro Negro foram confeccionadas no Laboratório de Laminação do DGEO – UFPE.

Análises químicas foram realizadas no laboratório Actlab's (Ontario, Canadá), em amostras do Preto São Francisco, Preto São Gabriel, Preto São Marcos, Preto Aracruz e Ouro Negro "in natura".

Os ensaios para a determinação dos índices físicos (massa específica aparente seca e saturada, porosidade e absorção aparentes), foram desenvolvidos nos laboratórios de Rochas Ornamentais do PPGEMinas e de Geoquímica do PPGEIOC da Universidade Federal de Pernambuco, utilizando-se a norma NBR 12.766/92.

Os ensaios de alterabilidade acelerada foram realizados expondo-se as superfícies lustradas e não lustradas às substâncias representativas dos agentes causadores da deterioração das rochas ornamentais. Notadamente a simulação da exposição das rochas às substâncias químicas presentes no meio ambiente urbano poluído. Toma-se assim, como base o ensaio de lixiviação estática denominado pelo IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo), como "ensaio de alterabilidade por imersão em líquidos reativos", conforme a metodologia estabelecida pelo IPT e recomendada por Becerra-Becerra & Costa (2003, 2007), Silva (2007), Frascá (2003).

O material foi imerso em soluções reativas por um período de 56 dias, já o período recomendado por Becerra-Becerra & Costa (2003, 2007), Silva (2007) é de 20 dias. Embora Frascá (2003), tenha usado para estes ensaios imersão em soluções reativas com pH entre 1,0 a 1,5 por período de 30 dias (condições mais aceleradas), neste trabalho foram utilizadas às soluções reativas com pH próximo ao pH das chuvas ácidas que ocorrem nos grandes centros urbanos (pH em torno de 3,0), e tempo de imersão de 56 dias, por tratar-se de condições mais próximas às condições ambientais reinantes nos grandes centros urbanos.

Os litotipos estudados foram submetidos a ensaios de alteração acelerada frente aos seguintes reagentes: ácido sulfúrico na proporção de 2:100.000, ácido nítrico à proporção de 1:100.000 e mistura de ácido nítrico e sulfúrico na proporção de

1:2:100.000; ácido clorídrico na proporção de 1:100.000, utilizando-se para cada litologia 08 corpos de prova de 5 x 5 x 2 cm (PSG, PSM, AC e ON). Estas análises foram desenvolvidas no Laboratório de Geoquímica do LEMA (Laboratório de Estudos Metalogenéticos Aplicados) do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco.

3.8 ATAQUE QUÍMICO

Consiste no ataque da rocha por diversos reagentes químicos, que representam substâncias comuns existentes no ambiente doméstico ou de trabalho. Dentre estes reagentes, os mais utilizados são cloreto de amônio, hipoclorito de sódio, ácido cítrico, ácido clorídrico, hidróxido de potássio (Frascá, 2001), cada um destes com um tempo diferente de reação, normativamente. É realizado principalmente em amostras comercializadas para utilização em pias e bancadas, e pode causar, além de perda de brilho, alterações de cor e mineralógicas bem como perda de massa.

CAPÍTULO IV – CONTEXTO GEOLÓGICO

4.1 PRETO SÃO GABRIEL, COLATINA - ES

Esta variedade de granito preto provém de uma área de afloramentos de diorito-norito situado na região da cidade de Colatina-ES. A região de Colatina localiza-se no Vale do Rio Doce e possui uma área de aproximadamente 1.439 km² (Figura 4.1).

As feições geradas no Baixo Vale do Rio Doce são bem marcadas na área que é caracterizada por uma morfologia que varia de W para E de colinas, tabuleiros e planície costeira. É delimitado a W pelas colinas baixas próximas à Colatina e por um importante falhamento com direção NNW-SSE (Lineamento Colatina), o qual exerce influência sobre a direção principal dos cursos d'água nessa área (Coelho, 2009).

A região do baixo Rio Doce dentro do estado do Espírito Santo é descrita entre os municípios de Baixo Guandu (divisa de MG/ES) e Colatina. Segundo Karmiol & Machado (2004) o conhecimento geológico da região do baixo Rio Doce está vinculado, sobretudo a investigações regionais realizadas na Faixa Araçuaí. Bilal et al(2001), descrevem em toda a extensão do vale do Rio Doce (Minas Gerais/Espírito Santo) um magmatismo Pré a Pós tectônico, representados pelas Suítes Galiléia (Pré-tectônico), Suíte Urucum (Sin-tectônico), complexos intrusivos anelares de Aimorés e Várzea Alegre (Tardi-a Pós-tectônico) e diques Sieno-Graníticos e pelos complexos de Aracé e Garrafão (Pós-tectônico), e inferem um modelo colisional para a geração desses granitóides.

Campos Neto & Figueiredo (1995) distinguem na região norte da província Mantiqueira duas Orogêneses principais associadas ao Ciclo Brasileiro/Panafricano: Orogênese Brasileiro I e a Orogênese Rio Doce. Descreve que estes conjuntos de Orogêneses seriam os resultados de uma conjunção orogênica de microcontinentes, arcos de ilhas e complexos acrecionários, que sofreriam uma intensa tectônica transtensional, semelhante à evolução proposta para o desenvolvimento da costa Oeste Norte-americana.

Neste contexto a Orogênese Brasileira I (~630 Ma) seria responsável pela formação dos dobramentos na borda sudeste do cráton São Francisco, pela acresção de diferentes microplacas bem como da formação de um arco magmático. O estágio final desta primeira Orogênese, de caráter extensional, seria representado pelo cinturão Itu, no estado de São Paulo.

A Orogênese Rio Doce subsequente, o mais novo componente deste sistema, é caracterizada como um evento tectono-magmático durante o fim do Proterozóico Superior e o início do Cambriano (580-480 Ma), sobretudo no interior da denominada microplaca Serra do Mar sendo que esta Orogênese seria responsável pela formação de batólitos cálcicos-alcálinos associados a um arco magmático formado entre 590 e 570 Ma.

O estágio de colisão continental (560-530 Ma) foi responsável pela migmatização e pela intrusão de granitos peraluminosos. Os granitos e pegmatitos associados a uma fase pós colisional teriam se formado entre 520 e 480 Ma. Portanto, a região de Aimorés e Baixo Guandu, se situaria entre a microplaca Serra do Mar, afetada pela Orogênese Rio Doce e pelo sistema de Cavalcamento de Juiz de Fora.

De acordo com trabalhos da CPRM (Féboli 1993), os granitóides brasileiros da Província da Mantiqueira são diferenciados em função das estruturas regionais, existindo três grupos principais: Maciços pré- a sin- às fases de deformações tangenciais (i); Maciços sin-transcorrências (ii) e Maciços pós-transcorrências.

O Complexo Aimorés caracteriza-se por uma estrutura interna de alto ângulo, com predomínio de mergulhos para o interior do corpo e presença de foliação de fluxo magmático nos granodioritos porfiríticos. O complexo é constituído por rochas básicas e intermediárias na sua parte central e por rochas progressivamente mais ácidas em direção à porção externa da estrutura. Figura 4.1 mapa geológico simplificado da região de Colatina.

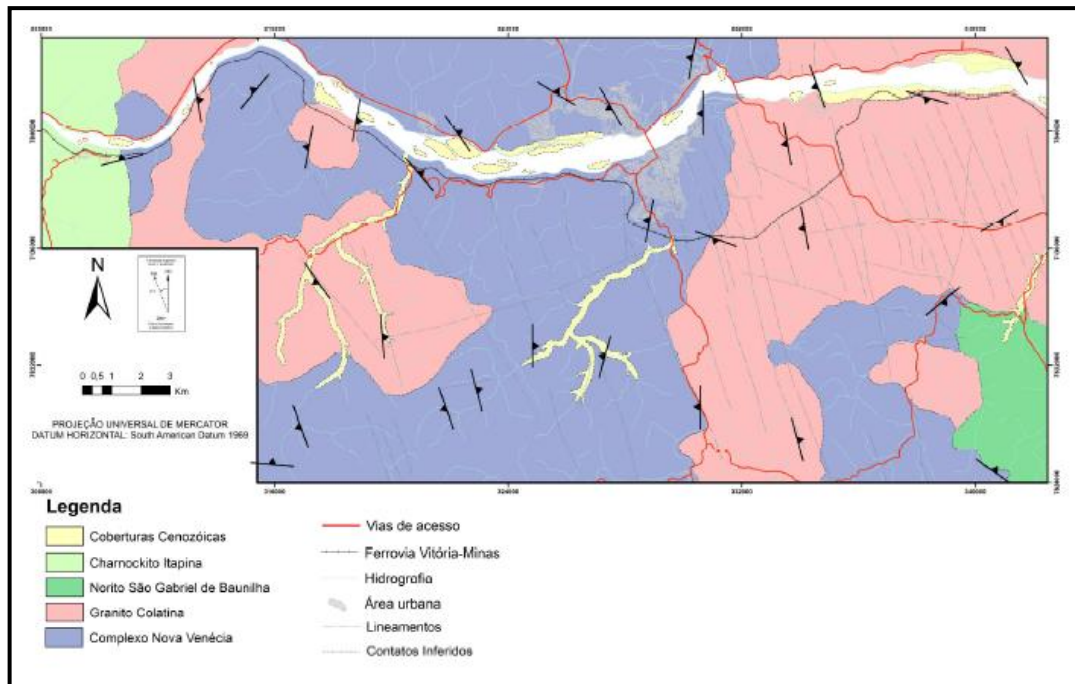


Figura 4.1 Mapa geológico simplificado para a região de Colatina ES.

Fonte: Michele, G, A. et al 2011.

Os blocos oriundos da lavra deste produto (Figura 4.2) são processados em Cachoeiro do Itapemirim - ES.



Figura 4.2 Pedreira do Preto São Gabriel em Colatina-ES

4.2 PRETO SÃO MARCOS, CASSERENGUE – PB.

O “granito” Preto São Marcos, aflora em forma de maciços e matacões, na área do Sítio Pedrinha D’água, no município de Casserengue, NE da Paraíba. É situada na parte sul da unidade geotectônica “Maciço São José do Campestre” (Dantas et al, 1998) da Província Estrutural Borborema (Região de Dobramentos Nordeste). As principais unidades lito-estratigráficas expostas na região incluem: embasamento arqueano composto de complexos gnáissicos migmatíticos; faixas supracrustais de rochas metassedimentares de proterozóica; e mais de uma suíte de granitóides intrusivos de idade Brasileira. Falhas e zonas de cisalhamentos transcorrentes de idade Brasileira são as feições mais importantes da região.

Encontra-se inserida na Suíte Gabro – Diorito - Monzonítica (NP3δ3gdm) (Fig 4.3). As rochas desta suíte ocorrem na porção central (área próxima a Casserengue), extremo norte da folha Solânea (município de Riachão) e associada aos granitóides da suíte intrusiva Solânea.

Próximo a Casserengue, ocorre como enxame de diques e pequenos plútons compreendendo área alongada na direção NE-SW, perfazendo cerca de 10 km². São monzonitos e gabros noritos grossos a médios, com orto- (Fe-hiperstênio, segundo Nascimento, 2000) e clino- (série diopsídio – hedenbergita) piroxênios e biotita constituindo até 45% da moda, nos termos menos evoluídos. Enclaves com bordos crenulados e lobados de rochas gabróicas finas menos evoluídas, ocorrem localmente. Enclaves ângulos do ortognaisse encaixante ocorrem nas rochas monzoníticas da região de contato (Figura 4.3 - Mapa geológico e Figura 4.4 Pedreira do PSM).

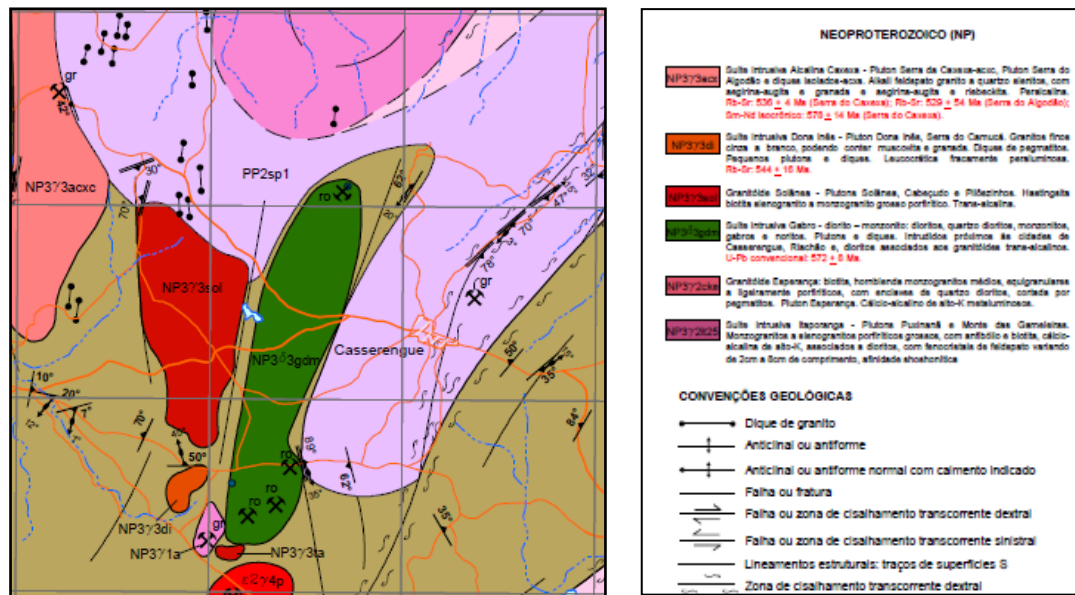


Figura 4.3 Mapa geológico simplificado para a região do (PSM) na Folha Solânea.

Fonte: Guimarães *et al* (2008).



Figura 4.4 – Pedreira do Preto São Marcos (PSM) em Casserengue-PB.

4.3 PRETO ARACRUZ, ARACRUZ - ES.

O “granito” Preto Aracruz está inserido no Complexo Paraíba do Sul onde ocorrem rochas gnáissicas, calcissilicáticas e anfibolitos. O Preto Aracruz é uma rocha classificada como anfibolito, macroscopicamente apresenta uma textura equigranular, homogênea, com granulação fina a média e cor preta. A rocha apresenta grãos que variam desde 0,3 até 0,5 mm, consistindo essencialmente em plagioclásio, anfibólio e biotita. Como acessórios apresenta minerais opacos e titanita. O anfibólio mostra inclusões de hematita.

A jazida apresenta um volume da ordem de milhões de metros cúbicos do granito Preto Aracruz, assegurando a lavra de um mesmo tipo de material, com características constantes, por períodos muitos longos. Neste contexto, estão as novas tecnologias de lavra de rochas ornamentais em pedreiras modernas, contando com a exclusão de explosivos que, aliada às cuidadosas inspeções de qualidade ao longo do ciclo de extração, conferem ao granito Preto Aracruz um produto de alta qualidade e de grande aceitação no mercado (Figura 4.5).



Figura 4.5 – Pedreira do Preto Aracruz (PAC).

4.4 OURO NEGRO, ICONHA/RIO NOVO DO SUL - ES.

O litotipo estudado nesta pesquisa, Ouro Negro, encontra-se inserido no Complexo Intrusivo de Rio Novo do Sul, cuja composição varia de quartzo-dioritos a granitos (litotipos intermediários: quartzo-monzodioritos, quartzo-monzonitos, tonalitos e granodioritos encaixadas em ortognaisses Neoproterozóico e gnaisses bandados migmatizados (sillimanita com granada gnaisses) de idade Paleoproterozóica. Esse conjunto está posicionado no Complexo Alegre, que por sua vez faz parte do Cinturão Móvel Ribeira, de idade Neoproterozóica. Dados magnetométricos indicam a existência de forte anomalia na região, permitindo inferir a ocorrência de um amplo magmatismo básico em subsuperfície. Esse fato, somado à forma irregular da intrusão, faz com que ela seja interpretada como um conjunto de apófises e "stocks". Dentre as rochas intrusivas, predominam granodioritos homogêneos e quartzo-dioritos. Os outros tipos afloram em pequenas porções, isoladamente ou em zonas mistas de rochas, podendo também corresponder a variações composicionais localizadas. A estrutura de fluxo, linear ou planar, pode ser bem desenvolvida, tendendo ao paralelismo com a xistosidade das rochas encaixantes. O grau de deformação não é expressivo, predominando tipos litológicos homogêneos e sem complicações estruturais, excetuando algumas porções quartzo-dioríticas, onde se observa fluxo turbulento, pequenas zonas de cisalhamento dúctil e veios sin-intrusivos falhados. Os contatos com as rochas encaixantes e aqueles entre as rochas das diferentes porções do complexo raramente estão expostos. Nas zonas mistas de rochas ocorrem tanto contatos bruscos quanto irregulares, assim como estruturas tipo *pillow*.

Uma grande quantidade de diques graníticos e veios quartzo-feldspáticos cortam todos os litotipos, com orientação e formas variadas. Diques de microdiorito de pequena espessura são intrusivos principalmente nos gnaisses, fundindo-os localmente.

A petrografia das rochas do Complexo Intrusivo de Rio Novo do Sul é simples, uma vez que os termos litológicos possuem composições mineralógicas semelhantes e texturalmente são hipidiomórficos granulares ou porfiríticos. O anfibólio possui,

provavelmente, composição ferrohastingsítica, não estando presente nos granitos e aparecendo nos granodioritos. Em alguns casos o plagioclásio corrói a microclina e vice-versa, e em outras situações nota-se o intercrescimento entre quartzo e microclina (intercrescimento gráfico) e quartzo e plagioclásio (mirmequita). Os cristais de plagioclásio e as biotitas formam a foliação primária das rochas com fluxo desenvolvido. Nos microdioritos o plagioclásio pode exibir bordas corroídas. Apatita e zircão são os minerais acessórios mais frequentes.

Comparando-se com análises químicas de rochas semelhantes da literatura, o quimismo do Complexo Intrusivo de Rio Novo do Sul revela um magmatismo enriquecido em Fe, K, Ti e P (principalmente granodioritos e quartzo-dioritos) e levemente depletado em Na. As composições mineralógicas e normativas nos mostram tipos litológicos supersaturados em sílica, e de caráter peraluminoso ($Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO) > 1,1$). Quanto à determinação do tipo petrogenético dos granitóides, predominam rochas da série magnetita e observa-se nos vários diagramas estudados características de magmas tanto tipo I quanto tipo S. Uma tendência cálcio-alcálica/álcali-cálcica para o complexo aqui estudado é observada em diversos diagramas, com rochas geradas provavelmente em ambiente de transição (final do ciclo compressivo/início do ciclo extensivo).

O que parece predominar na formação das rochas do Complexo Intrusivo de Rio Novo do Sul são processos de cristalização fracionada, não se excluindo a participação de mecanismos de fusão parcial e mistura de magmas.

O Complexo Intrusivo de Rio Novo do Sul exibe características que se assemelham com outros complexos intrusivos do sul do Espírito Santo, como por exemplo, os maciços de Castelo e Iconha. Figura 4.6 Pedreira do Ouro Negro, Rio Novo do Sul-ES.



Figura 4.6 Pedreira do Ouro Negro, Rio Novo do Sul-ES.

4.5 PRETO SÃO FRANCISCO, SÃO FRANCISCO – PB.

O Precambriano da Paraíba foi alvo de um intenso e variado plutonismo brasileiro, cujo episódio principal ocorreu no intervalo de 640 a 570 Ma. A nomenclatura desses granitóides baseia-se na classificação pioneira de Almeida *et al.* (1967), definida na Faixa Piancó-Alto Brígida, subsequentemente ampliada por Sial (1987) e diversos autores. Não há um consenso entre os autores, especialmente em relação aos granitóides peralcalinos, shoshoníticos e ultrapotássicos, mas Santos & Medeiros (1997; 1999) sintetizaram esse plutonismo através de uma sucessão de pulsos, que deram origem às supersuítas I (cedo a sin-Brasiliiano), II (tardi-Brasiliiano) e III (pós-Brasiliiano). Trata-se, na verdade, de um esquema simplificado, havendo tipos transicionais. A figura 4.7 mostra a distribuição dos granitoides brasileiros na Paraíba e o Domínio Transversal. A Supersuite I inclui uma suíte gabro diorítica cedo a sintectônica e várias suítes graníticas essencialmente sintectônicas, incluindo duas calcialcalinas, uma trondhjemítica e uma peraluminosa. Os granitóides cedo a sintectônicos são representados pelos litotipos da suíte diorítica tonalítica, sendo formada por tonalitos, quartzodioritos e biotita-hornblenda granodioritos com segregações graníticas. Na Faixa Seridó, esta suíte foi posicionada no estágio pré a cedo brasileiro, com idade de 763 Ma (Leterrier *et al.*, 1990). As suítes graníticas incluem as associações calcialcalina médio a alto K; calcialcalina normal com epidoto magmático, trondhjemítica e peraluminosa. A suíte é caracterizada por granitóides porfiríticos de composição monzonítica, sienogranítica e granodiorítica,

conhecidos na literatura como tipo Itaporanga (Almeida *et al.*, 1967). Ela consiste em grandes complexos formados principalmente por granito com megacristais de feldspato potássico em coexistência com diorito e uma fase de mistura entre eles (Mariano & Sial, 1990). A suíte corresponde aos granodioritos tipo Conceição, de Almeida *et al.* (1967), cuja composição varia de tonalito a granodiorito, com fases menores de diorito e gabro, ocorrendo como plútons de alto nível crustal, principalmente na Faixa Piancó Alto Brígida. Ela possui típicos enclaves máficos e *clots* ricos em actinolita, estes últimos sendo considerados como fragmentos da fonte (basáltica?) (Sial, 1993). Os granitóides tipo Serrita têm ocorrência restrita, variando de tonalito a granodiorito, com biotita e epidoto magmático como principais fases máficas. Os dados de idades Rb-Sr e U-Pb em zircão registrados para esta supersuíte espalham-se no intervalo entre 644-620 Ma. Idades modelos Nd (TDM) variam de 1,1 a 1,4 Ga, exceto os granitóides calcialcalinos ricos em K do domínio Rio Grande do Norte e os granitoides trondhjemíticos (TDM>2,0 Ga) (Ferreira *et al.*, 1998). A suíte leucogranítica peraluminosa ocorre na Faixa Seridó, sendo representada por ilmenita granitos e leucogranitos com biotita (muscovita, granada), exibindo comumente feições migmatíticas (Jardim de Sá, 1994). Esses tipos podem ter evoluído para subtipos especializados, que seriam a fonte de depósitos granitófilos de W e pegmatíticos (ricos em Be, Li, Ta).

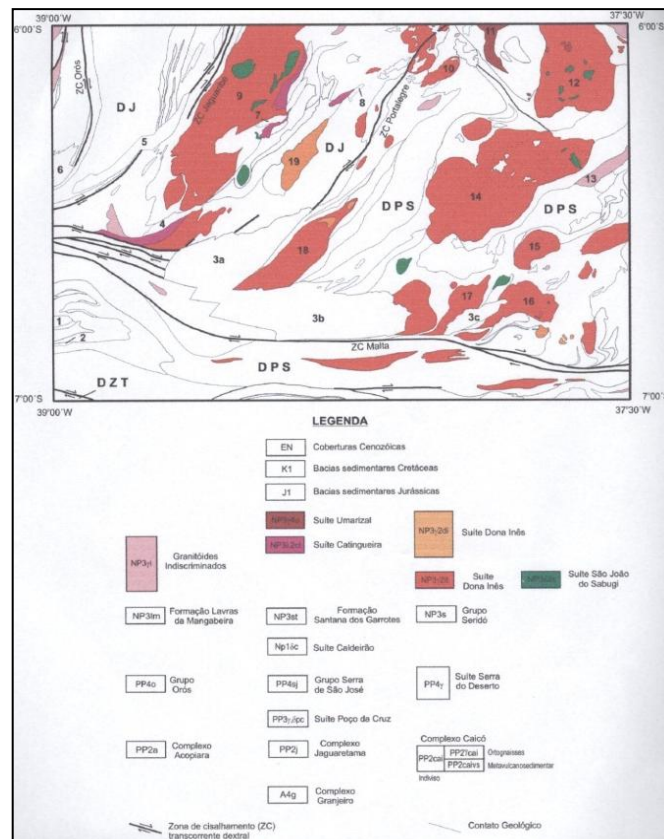


Figura 4.7 Mapa simplificado da folha Sousa evidenciando a Suíte intrusiva São João do Sabugi: dioritos, quartzo dioritos, gabros e NP3 gabronoritos. Fonte: Mendes, V. (CPRM)

O corpo máfico aflorante em São Francisco apresenta-se homogêneo, não deformado, de cor preta. Apresenta granulação fina a média, textura equigranular e coloração preta a grafite, sendo constituído de gabros, dioritos, grabronoritos e de extensos maciços parcialmente cobertos por solo eluvial argiloso e escuro.

As exposições mostram-se pouco afetadas pela tectônica ruptural que atuou na região, salientando-se nos afloramentos estudados a baixa incidência de fraturas, veios de quartzo, enclaves, pegmatitos e de pontos de oxidação. Figura 4.8 Mapa Geológico de semi-detalle.

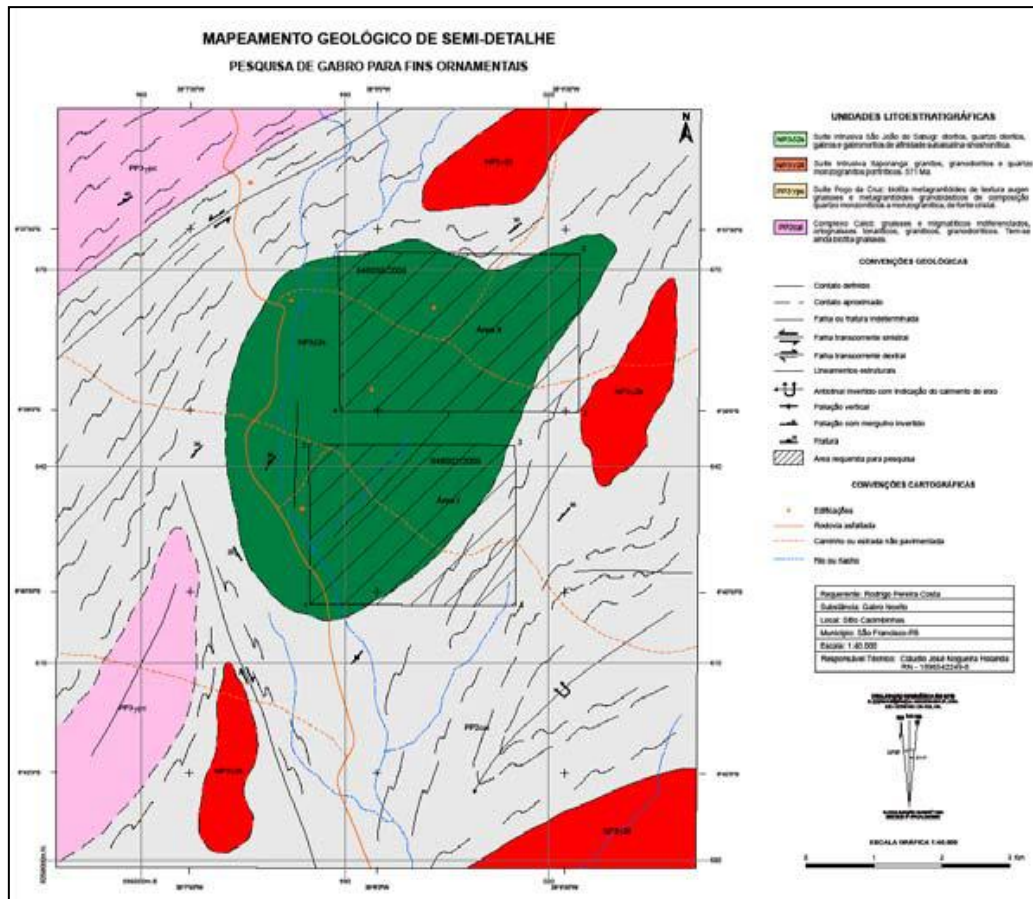


Figura 4.8 Mapa de Semi-detálhe da ocorrência do Granito Preto São Francisco. Fonte: Mendes, V. (CPRM)

O “granito” preto São Francisco (PSF) apresenta textura equigranular, com granulação média, cor preta, e ocorre como maciços. Encontra-se destituído de foliação, constituindo um litotipo homogêneo não deformado, com excelentes condições de explotabilidade como rocha ornamental. Contudo, a pedreira encontra-se desativada. Figura 4.9 e figura 4.10.



Figura 4.9 - Vista da área dos afloramentos do GSF



Figura 4.10 – Afloramento do preto São Francisco.

CAPÍTULO 5 – AMOSTRAGEM E MÉTODOS

5.1 INTRODUÇÃO

A pesquisa foi desenvolvida através do estudo de 5 (cinco) litotipos de rochas máficas brasileiras, 4 (quatro) delas já em estágio de comercialização como do tipo “granito preto”. A partir de placas lustradas destes produtos foram produzidos corpos de prova padronizados nas dimensões 5 x 5 x 2 cm, conforme recomendado pelas normas ABNT, na quantidade de 10 (dez) corpos de prova/litotipo. Foram destinados 8 corpos de prova de cada litotipo para 4 diferentes testes de alterabilidade acelerada, com o concurso dos seguintes ensaios com soluções ácidas (pH = 3): H_2SO_4 , HNO_3 , $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$ e HCl . Foram destinados 2 corpos de prova de cada litotipo para ensaios gelo-degelo.

5.2 COLETA DE AMOSTRAS E PETROGRAFIA

Todo estudo de caracterização de propriedades físicas e/ou químicas de uma rocha ornamental depende essencialmente de sua representatividade em relação à área prevista para a cava de mineração. Rochas ditas isotrópicas são, em princípio, menos complexas para se assegurar uma amostragem representativa das condições que serão encontradas na lavra destas rochas. É sempre pertinente se reconhecer que rochas ditas “isotrópicas”, intrusivas, podem manter estas características em toda a extensão do corpo aflorante. Entretanto, tanto a textura, quanto a composição mineralógica, não serão as mesmas se compararmos o produto extraído do núcleo intrusivo em relação aos seus bordos, notadamente na vicinalidade das rochas crustais atravessadas pelo *plug* magmático. As condições internas do corpo intrusivo se resfriam mais lentamente assim como são submetidas a condições de pressão diferentes daquelas que ocorrem nas margens e ápices da progressão intrusiva no domínio crustal. Isto se manifesta principalmente por diferenças texturais (principalmente no que concerne as dimensões de fenocristais), orientações incipientes (margens do corpo intrusivo, por pressões cisalhantes), digestões parciais de material lítico na franja de interação entre o magma e as rochas

encaixantes. Naturalmente, isto implica em modificações na composição mineralógica, geoquímica e, enfim, textural, quando comparamos amostras do mesmo corpo intrusivo. Este é um problema ainda não suficientemente previsto ou resolvido, quando da emissão de laudos técnicos exigidos pelo DNPM e em relação às expectativas de resposta do produto final em relação às suas propriedades mecânicas de resistência à alterabilidade quando, finalmente, aplicados nas diversas instâncias de sua categoria como “rocha ornamental”.

Como de praxe, em se tratando de uma rocha, objeto inerente das Geociências, a lâmina petrográfica do produto é a primeira fonte de informações relativas à sua composição mineralógica e textural. Classicamente, estas informações fornecem subsídios previsionais com relação à vulnerabilidade do produto, consoantes clássicas indicações da Série de Bowen (década de 30, século XX) retomada e de certa forma copiada por outros autores.

As análises petrográficas foram estudadas levando em consideração as determinações gerais das Normas NBR – 12768 (ABNT-2010) e C-294-86 (ASTM), bem como as orientações presentes em Navarro (1998), Rodrigues et al. (1996, 1997) e Artur et al. (2001).

A análise petrográfica é realizada através de exames macroscópico e microscópico, que permitem identificar a natureza ou tipo de rocha, os minerais presentes e suas interrelações, o grau de alteração, o estado microfissural dos cristais, sua granulação e textura, além de outras características que possam influenciar na durabilidade da rocha. Através dessa análise é possível se fazer uma reconstituição histórica da rocha, em que se incluem informações que vão desde as condições físico-químicas atuantes na época de sua formação até a identificação de eventos geológicos (tectônicos, hidrotermais, metassomáticos, intempéricos) a que foi submetida ao longo de sua existência (VIDAL, BESSA & LIMA, 1999). Certas estruturas, como, por exemplo, a microfissuração, pode exercer papel relevante no comportamento mecânico dos materiais rochosos, com influência significativa em suas propriedades.

As análises petrográficas foram realizadas no LEMA (Laboratório de Estudos Metalogenéticos Aplicados) e Laboratório de Microscopia – DGEO/UFPE.

5.2.1 Preto São Gabriel

A rocha classificada como diorito norito o “granito” Preto São Gabriel (PSG), macroscopicamente apresenta uma estrutura compacta, com granulação média e cor preta.

Microscopicamente apresenta uma textura inequigranular de granulação média, contendo cristais grandes de plagioclásio. É composta essencialmente por plagioclásio (41,8%), piroxênios (clino e ortopiroxênio) (24%) sendo o predomínio do CPX, biotita (17,7%), hornblenda (8%) e opacos (magnetita) (7,2%), titanita (3%). Como acessório ocorre apatita, em geral inclusa no piroxênio, anfibólio e no plagioclásio. Tabela 5.1 Composição modal dos litotipos estudados.

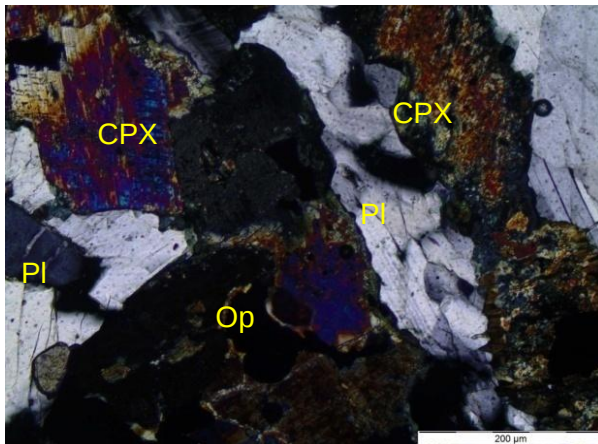
O piroxênio (entre 0,35 e 2,5 mm) é subidiomórfico e predomina o (CPX) em relação ao (OPX). O ortopiroxênio apresenta retardo baixo (amarelo-amarronzado), estrutura esquelética, e é substituído por anfibólio e/ou biotita ao longo das clivagens ou redor dos grãos. Ele ocorre como agregados contendo inclusões de minerais opacos. O clinopiroxênio apresenta cor verde azulado.

O plagioclásio ocorre como cristais tabulares e megacristais (0,30 e 10 mm). Os cristais são idiomórficos (principalmente os megacristais) a xenomórficos.

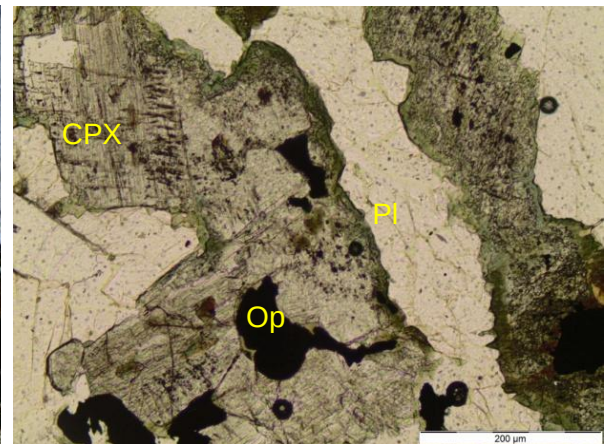
O anfibólio (entre 0,5 e 2,5 mm) é uma hornblenda primária e ocorre como cristais isolados ou na matriz associados aos minerais opacos e à biotita.

A biotita (0,25 e 2 mm) apresenta às vezes, megacristais com deformação incipiente. Apresenta lamelas idiomórficas a subidiomórficas e cor castanha, em geral associada ao anfibólio e piroxênio. Figura 5.1 Fotomicrografia do PSG. (A, B, C e D)

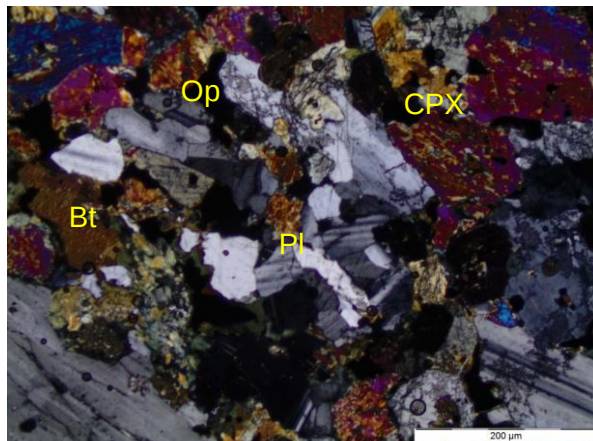
Figura 5.1 Fotomicrografia do PSG. (A, B, C e D)



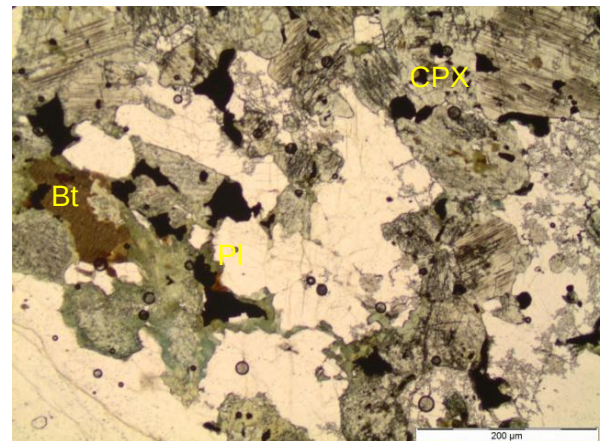
Fotomicrografia em luz ortoscópica (A)



Fotomicrografia em luz natural polarizada (B)



Fotomicrografia em luz ortoscópica (C)



Fotomicrografia em luz natural polarizada (D)

Tabela 5.1 Composição modal dos litotipos estudados.

MATERIAIS		COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA (%)						
		Plagioclásio	Piroxênio	Biotita	Hornblenda	Opacos	Titanita	Acessórios
Nome Comercial	Classificação Petrográfica							
Ouro Negro	Gabro norito	63,1	8,9	17,27	6,31	4,6	-	2
Aracruz	Anfibolito	44,5	-	2,88	48,4	3,52	1	2
São Gabriel	Diorito norito	41,8	24	17,7	8	7,2	1,2	2
São Marcos	Biotita diorito	59,8	14,35	20,4	3,86	1,65	-	1
São Francisco	Diorito gabro	42	30	15	8	3	-	2

5.2.2 Preto São Marcos

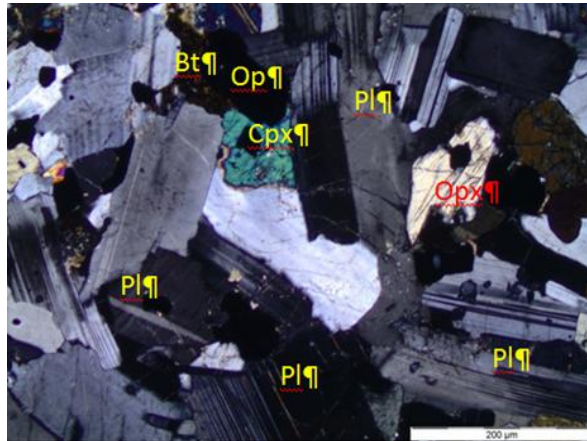
A rocha é classificada como Piroxênio biotita diorito. O “granito” Preto São Marcos (PSM), macroscopicamente apresenta uma estrutura compacta, com granulação média e cor preta.

Microscopicamente apresenta uma textura inequigranular de granulação média, contendo cristais grandes de plagioclásio. É composta essencialmente por plagioclásio (59,86%), piroxênios (clino e ortopiroxênio) (14,35%) sendo o predomínio do CPX, biotita (20,4%), hornblenda (3,87%) e opacos (magnetita) (1,65%). Como acessório ocorre apatita, em geral inclusa no piroxênio e no plagioclásio. Ver Tabela 5.1.

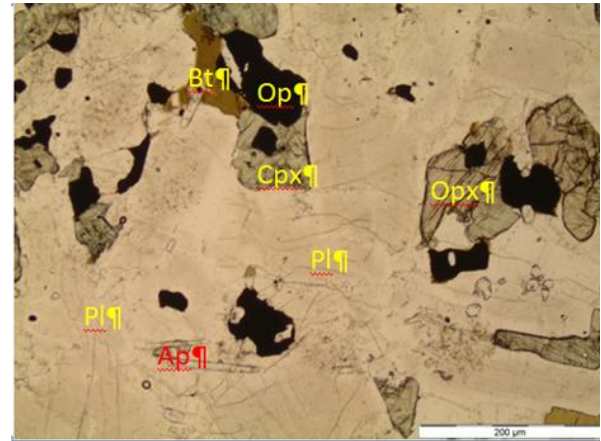
O piroxênio (entre 0,25 e 2,5 mm) é subidiomórfico e predomina ligeiramente (OPX) em relação ao (CPX). O ortopiroxênio apresenta retardo baixo (amarelo-

amarronzado), estrutura esquelética, e é substituído por biotita ao longo das clivagens ou ao redor dos grãos. Ele ocorre como agregados contendo inclusões de minerais opacos. O clinopiroxênio apresenta cor verde azulado e feições em corda Fig. 5.2 C e D. Figura 5.2 Fotomicrografia do Preto São Marcos (PSM).

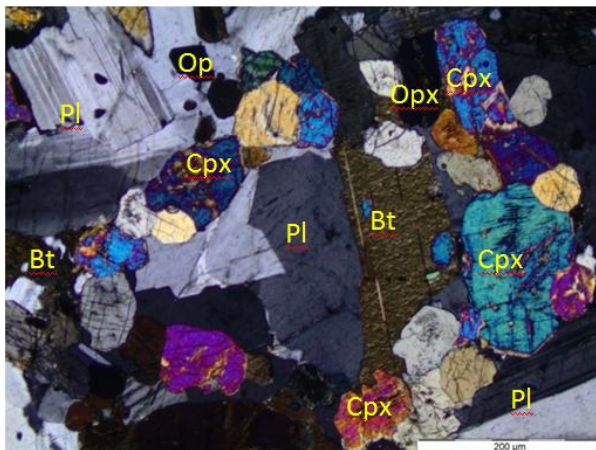
Figura 5.2 Fotomicrografias (A, B, C e D) do Preto São Marcos (PSM)



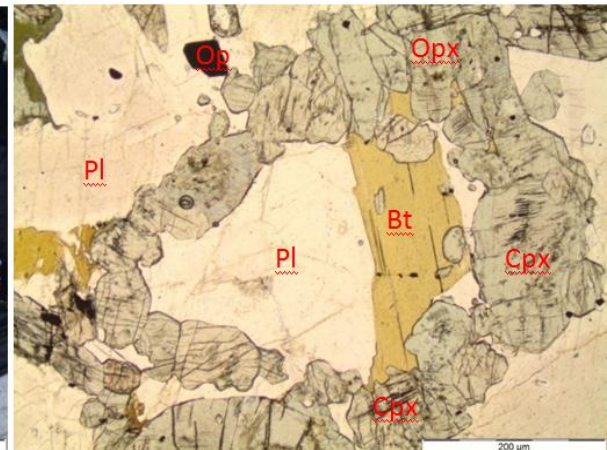
Fotomicrografia em luz ortoscópica (A)



Fotomicrografia em luz natural polarizada (B)



Fotomicrografia em luz ortoscópica (C)



Fotomicrografia em luz natural polarizada (D)

5.2.3 Preto Aracruz

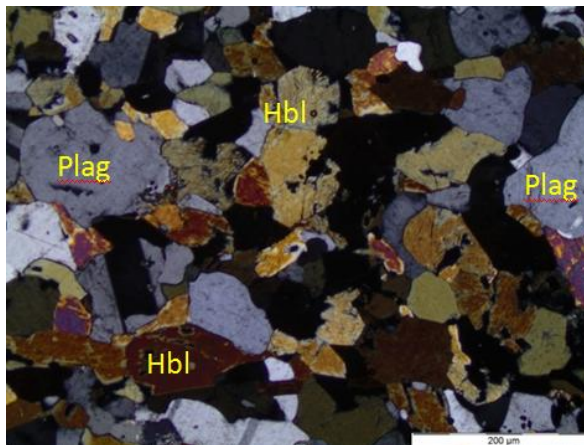
O “granito” preto Aracruz (PAC), é uma rocha anfibolítica. Macroscopicamente apresenta uma estrutura compacta, com granulação média.

Microscopicamente apresenta uma textura granoblástica com granulação fina a média, estrutura maciça. É composta essencialmente por plagioclásio (44,5%), biotita (2,88%), hornblenda (48,4%) e opacos (magnetita) (3,52%). Como acessório ocorre apatita, em geral incluída no plagioclásio e na hornblenda, e titanita (1%)

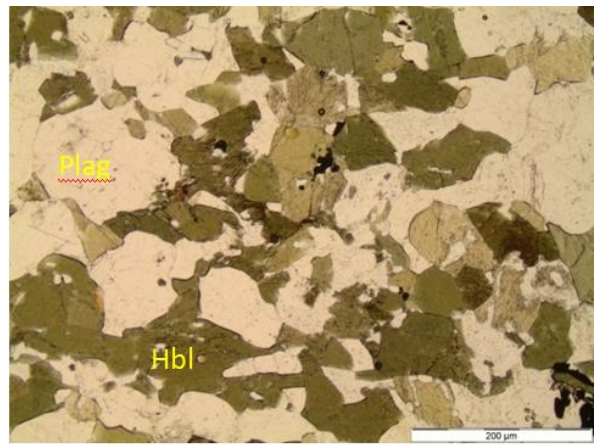
associada a opacos. Ver Tabela 5.1. Figura 5.3 Fotomicrografia do PAC. (A, B, C e D)

O plagioclásio ocorre como cristais idiomórficos a subdiomórficos (0,15 e 5 mm). O anfibólio (entre 0,5 e 2,5 mm) é uma hornblenda primária e ocorre associado aos minerais opacos e à biotita.

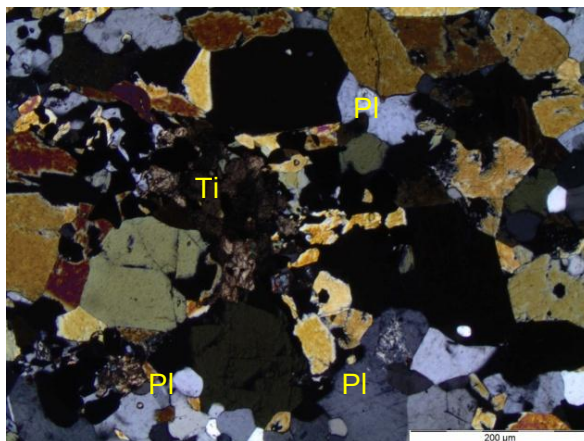
Figura 5.3 Fotomicrografia do PAC (A, B, C e D).



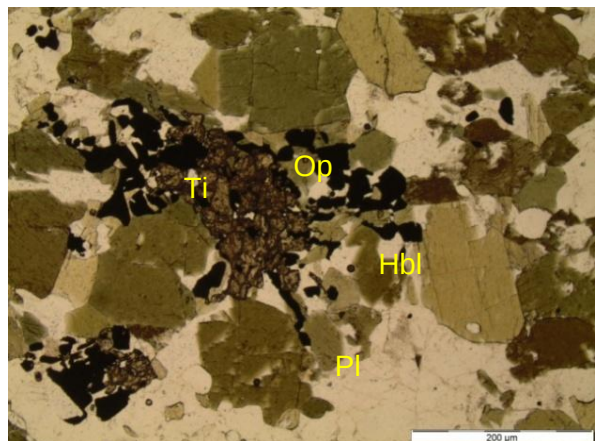
Fotomicrografia em luz ortoscópica (A)



Fotomicrografia em luz natural polarizada (B)



Fotomicrografia em luz ortoscópica (C)



Fotomicrografia em luz natural polarizada (D)

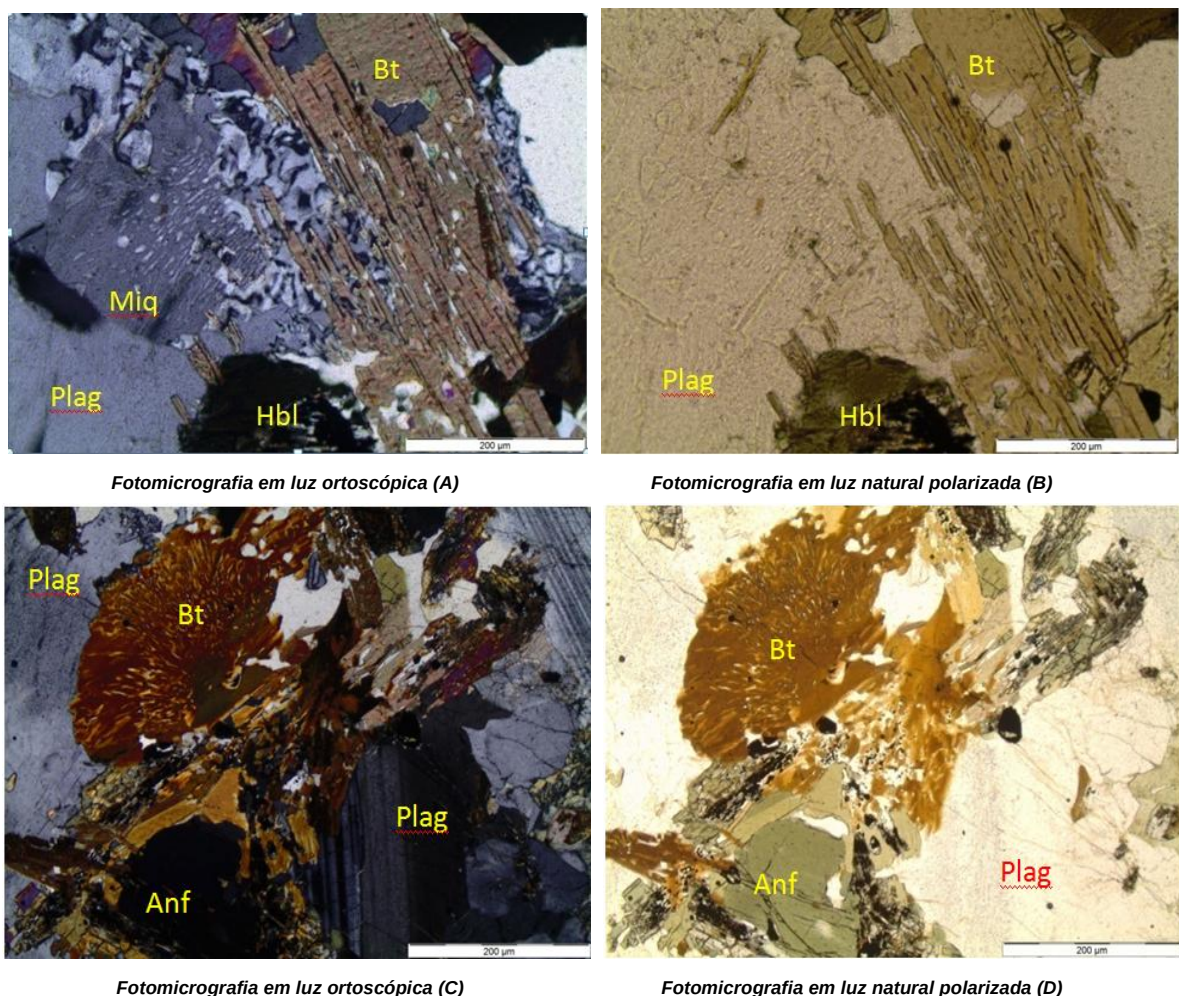
5.2.4 Ouro Negro

O litotipo Ouro Negro é classificado como um gabro norito. Macroscopicamente apresenta uma estrutura compacta, com granulação média a grossa, cor cinza escuro a preta.

Microscopicamente apresenta uma textura inequigranular de granulação média a grossa, contendo cristais grandes de plagioclásio, idiomórfico e subdiomórfico. É composta essencialmente por plagioclásio (63,1%), piroxênios (clino e ortopiroxênio)

(8,9%) sendo o predomínio do CPX, biotita (17,27%), hornblenda (6,31%) e opacos (magnetita) (4,6%) incluso no piroxênio em forma de agulhas (Fotomicrografia nos anexos). Como acessório ocorre apatita, em geral inclusa no piroxênio e no plagioclásio. Ver Tabela 5.1. Figura 5.4 Fotomicrografia do Ouro Negro (A, B, C e D). O plagioclásio ocorre como cristais tabulares, alguns apresentando mirmequita. Ocorre exsoluções em piroxênio (CPX e OPX). Observam-se colônias de anfibólios indicando uma textura de descompressão e grão de anfibólio sendo substituído por uma textura simplectítica.

Figura 5.4 Fotomicrografia do ON (A, B, C e D).



5.2.5 Preto São Francisco

Macroscopicamente constitui uma rocha de composição essencialmente diorítica/gabróica, média a grossa, inequigranular. O preto São Francisco ao

microscópio apresenta uma textura granoblástica, inequigranular de granulação média a grossa sem orientação preferencial.

Apresenta plagioclásio com percentual médio de 42% sendo o mineral félsico principal, enquanto o clinopiroxênio/anfibólio e biotita são os minerais máficos predominantes. Zircão, apatita, e opacos ocorrem como minerais acessórios. Este mineral forma cristais idiomórficos a xenomórficos, possuindo comprimento entre 0.5 mm e 0.25mm. Apresentam geminação polissintética, às vezes associada à geminação do tipo Carlsbad, bem como zonação normal. Estimativas do teor em anortita (método Michel-Levy) variam em torno de 24%. Contém inclusões de zircão, opacos, apatita, biotita, e clinopiroxênio. Em alguns cristais são observados processos de alteração e saussuritização.

O clinopiroxênio com percentual médio de 30%, ocorre sob a forma de cristais xenomórficos com dimensões entre 0.4 mm e 3 mm, por vezes com macla simples e frequentemente com bordas transformadas para anfibólio. As características óticas observadas, tais como: tipo pleocroísmo em tons verdes, ângulo de extinção elevado ($Z'c = 35-40^0$), sinal ótico positivo e $2 V_z$ de 60^0 , permitiram classificá-lo como da família do diopsídio-hendebergita.

O anfibólio possui um teor médio de 8% formando cristais hipidiomórficos.

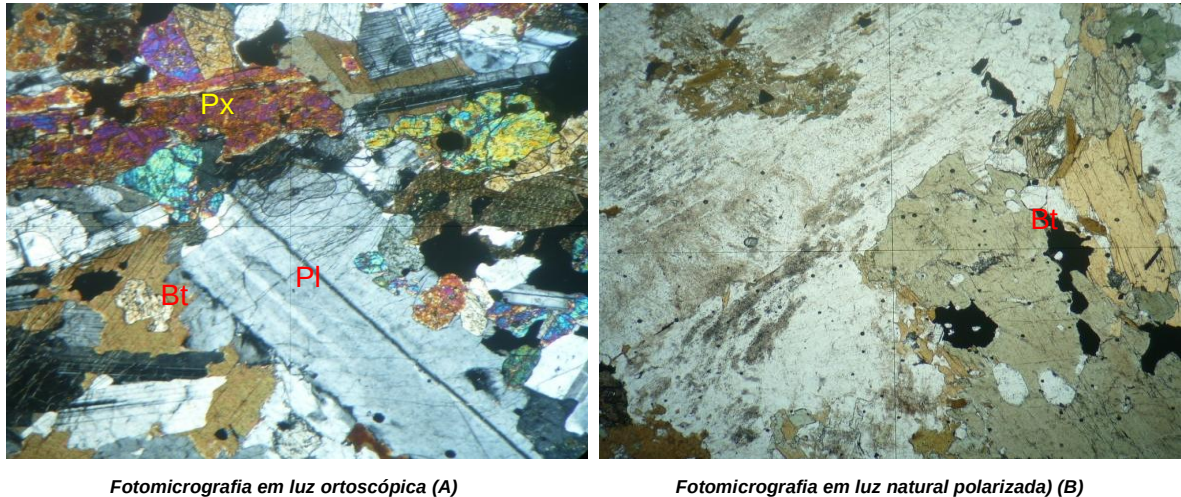
A biotita representa 15% e aparece como lamelas hipidiomórficas a xenomórficas de cor marrom avermelhada, desenvolvendo contatos interdigitados e retos com os demais minerais ferromagnesianos.

Os minerais opacos com percentual médio de 3% são cristais idiomórficos a hipidiomórficos dispersos na matriz da rocha, atingindo até 0,3 mm de tamanho. Um segundo tipo é formado por grãos idiomórficos derivados da transformação de piroxênio e biotita.

A apatita com 2% em média corresponde a pequenos cristais precoces idiomórficos usualmente prismáticos finos e/ou aciculares, evidenciando uma cristalização rápida dos mesmos. Ver Tabela 5.1 A titanita ocorre como acessório e em cristais idiomórficos a hipidiomórficos com dimensões inferiores a 2 mm. Figura 5.5 Fotomicrografia do preto São Francisco (PSF) A e B.

O zircão ocorre como traços e inclusões nas paletas de biotita, corresponde a pequenos cristais precoces, idiomórficos com hábito prismático fino.

Figura 5.5 Fotomicrografia – Preto São Francisco



5.3 ENSAIOS TECNOLÓGICOS – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.3.1 Determinação de Índices Físicos

Inicialmente foi realizado o ensaio de índices físicos para todos os corpos de prova (total de 40) para os 4 litotipos estudados (PSG, PSM, PAC e ON), mais 02 placas do PSF. Todos os corpos de prova foram acondicionados em cubas onde se colocou água deionizada até o nível de 1/3 da altura do corpo de prova até 4 horas, após o que se completou o nível d'água até 2/3 de sua altura durante mais 4 horas e, finalmente, completou-se o nível com água até as amostras ficarem totalmente imersas durante 48 h (ensaio por imersão). Após as 48 horas foram medidos os pesos submersos e saturado, utilizando-se para tanto uma balança de precisão Marconi, modelo AS500C, com capacidade máxima 500 g e precisão de duas casas decimais, no Laboratório de Rochas Ornamentais, do PPGEMinas/UFPE. Em cada caso, os valores finais das propriedades físicas correspondem a uma média de 3 leituras. Em seguida os corpos de prova foram para a estufa a 70/80° por 48 horas, após o que se realizou nova pesagem dos corpos de prova (peso seco). Enfim, concluídas as medições e aquelas dos índices físicos, os corpos de prova foram

separados para os ensaios de alterabilidade acelerada (total de 32 placas) e gelo-degelo (total de 10 placas).

5.3.2 Ensaios de alterabilidade acelerada

Para o ensaio de alterabilidade acelerada foram utilizadas 8 placas, para cada litotipo estudado, duas para cada ácido: P.1 e P.2 (H_2SO_4), P.3 e P.4 (HNO_3), P.5 e P.6 (mistura - $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$) e P.7 e P.8 (HCl), todos os ácidos inicialmente ajustados para o $\text{pH} = 3$. Essas placas ficam em imersão total por 7 dias, em seguida são retiradas uma por uma com ajuda de uma pinça, medindo-se o pH da solução ácida residual onde o corpo de prova esteve imerso. O ensaio cobriu um período total de tempo de 56 dias, acompanhado por medidas dos índices físicos a cada 28 dias.

A medida do pH das soluções de lixiviação estática foi devidamente aferida pelo pH metro de marca Digimed, modelo DN2 calibrado. As amostras retiradas são lavadas em água deionizada e colocadas de volta ao recipiente esvaziado que novamente é preenchido com a solução ácida padrão do ensaio em desenvolvimento. A solução residual de cada semana precedente é envasada em recipientes de poliestireno hermeticamente fechados. Este procedimento é repetido placa por placa.

Um ataque ácido abrange simultaneamente toda a paragênese exposta no corpo de prova. Sua eficácia depende logicamente da concentração deste ácido na solução, mas, também de forma decisiva, da maior ou menor vulnerabilidade da fração mineral submetida à agressão química, o que em parte, no que concerne aos silicatos, é bem definido pela Série de Bowen (Figura 5.6).

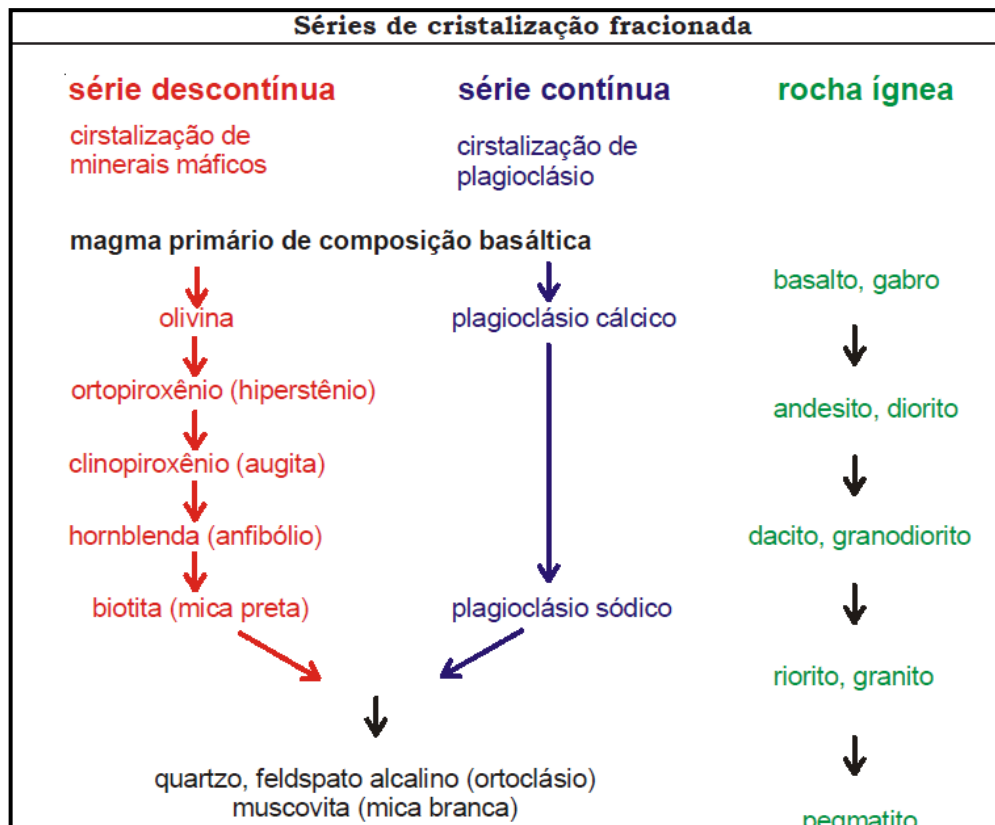


Figura 5.6 Modelo de evolução magmática da série Ca-alcalina, segundo Bowen (1928).

Assim, da maior para a menor vulnerabilidade temos: olivinas → piroxênios → anfibólios → plagioclásios cálcicos → biotita → plagioclásios sódicos → muscovitas → quartzo. No caso de rochas máficas tipo “granito preto” os componentes minerais principais são: piroxênios, anfibólios e feldspatos cálcicos (principalmente andesina ou labradorita), os quais perfazem, via de regra, 80-90% da composição rocha-total (RT). De forma mais ocasional ou normalmente subordinada, podem ser constatadas biotitas. Minerais opacos (magnetita, ilmenita, cromita) são frequentes, porém em quantidades acessórias ($\leq 5\%$).

Um segundo fator de alterabilidade a considerar é o de índice da equigranularidade, ou seja, aquele retratado pelo conceito de que “quanto maior for a superfície específica de um considerado mineral, maior a sua vulnerabilidade aos ataques químicos”. Sua importância, contudo, cede lugar ao conceito predominante que “não importando as dimensões dos minerais, aqueles mais vulneráveis ao intemperismo serão mais rapidamente consumidos nos processos intempéricos”.

A seleção do $\text{pH} = 3$ é uma escolha que atende a condições de chuva fortemente ácidas, muito frequentes em áreas industriais ou densamente urbanizadas. Condições ácidas extremadas e ocasionais, ocorrem em algumas das mais industriais cidades norte-americanas, com registros que chegam a $\text{pH} = 2,4$ (NASA, 2013). Em contraposição, pH de chuvas ditas “comuns” envolvem essencialmente ácido carbônico diluído, formado a partir do CO_2 contido na atmosfera e que, neste caso, teoricamente, resultaria em $\text{pH} = 5,6$ (Andrews *et al.*, 1996). Enfim, a escolha do $\text{pH} = 3$, de certa forma, atende as necessidades temporais de ensaios em bancada, ao longo de um razoável prazo de tempo de 8 (oito) semanas.

A periodicidade de leituras de pH , definida para cada 7 (sete) dias pode ser considerada adequada para a intensidade de ataques ácidos em nível de $\text{pH} = 3$, suficiente para colocar em evidência toda a evolução reativa da solução, transposta para diagramas de duas variáveis.

Os tipos selecionados de solução ácida foram definidos segundo suas formações naturais na atmosfera terrestre, e que incidem na superfície do planeta via pluviométrica. Nestes processos, são considerados gases como H_2S , nitrogênio, assim como o *spray* marinho (concentrado em cloretos) que, e por meio de reações químicas em que intervém a água, resultam na formação de chuvas ácidas (Baird *et al.*, 2011), contendo concentrações diluídas de ácidos fortes tais como: H_2SO_4 , HNO_3 , HCl , além da previsível mistura $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$. Assim, a metodologia empregada constou da alterabilidade acelerada imposta a corpos de prova de diferentes “granitos pretos”, com dimensões padronizadas $5 \times 5 \times 2$ cm, em total imersão em soluções ácidas distintas de H_2SO_4 , HNO_3 , mistura $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$, e HCl , renovadas a cada 7 dias, durante 8 semanas, em concentrações controladas a $\text{pH} = 3$.

Os dados dos ensaios de alterabilidade acelerada, transpostos em diagramas de duas variáveis, revelaram uma morfologia algo repetitiva, tendo como elementos identificadores fundamentais o pH da solução ácida residual, que expressa a depleção da rocha, com valores de pH em diminuição progressiva (Figura 5.7 e 5.8), geralmente marcada por uma deflexão suavizada a partir da terceira para a oitava

semana. O delineamento assim caracterizado sugere linhas de regressão de segundo grau, configurando, uma feição de caráter logarítmico.

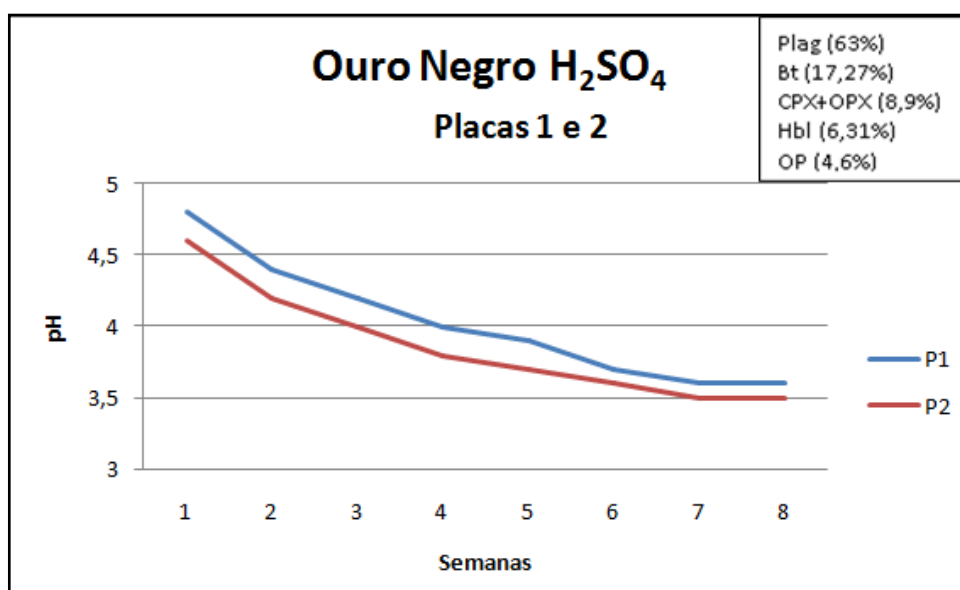


Figura 5.7 Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida (H₂SO₄) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” Ouro Negro.

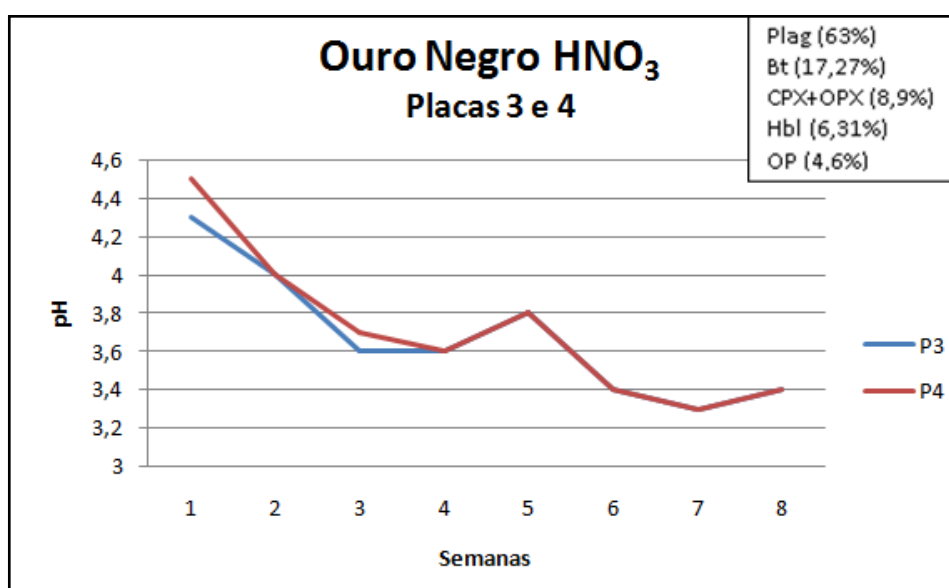


Figura 5.8 Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida (HNO₃) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” Ouro Negro.

Dentro deste sistema, o habitual é que o pH da solução ácida seja sempre descendente, até mesmo podendo se repetir tanto na placa 3 como na placa 4, em semana próxima subsequente. Este comportamento é decorrente do fenômeno de

depleção natural seletiva em que os minerais mais susceptíveis aos ataques ácidos são minimizados ou mesmo suprimidos sequencialmente. Nas condições ocasionais de reversão de tendência (Ver figura HNO_3) a explicação possível seria textural, em que o processo de ataque ácido tenha removido minerais que estejam protegendo outros minerais, estes últimos mais vulneráveis ao ataque ácido.

Este comportamento morfológico da curva de regressão seria típico de granitos pretos em que piroxênios têm participação significativa ($\geq 5\%$) na RT. Nestes casos, ao termo da primeira semana, a solução residual apresenta $\text{pH} \geq 4,0$ qualquer que tenha sido a solução ácida empregada (Figuras 5.9 e 5.10), podendo ocorrer exceção no caso de mistura $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$.

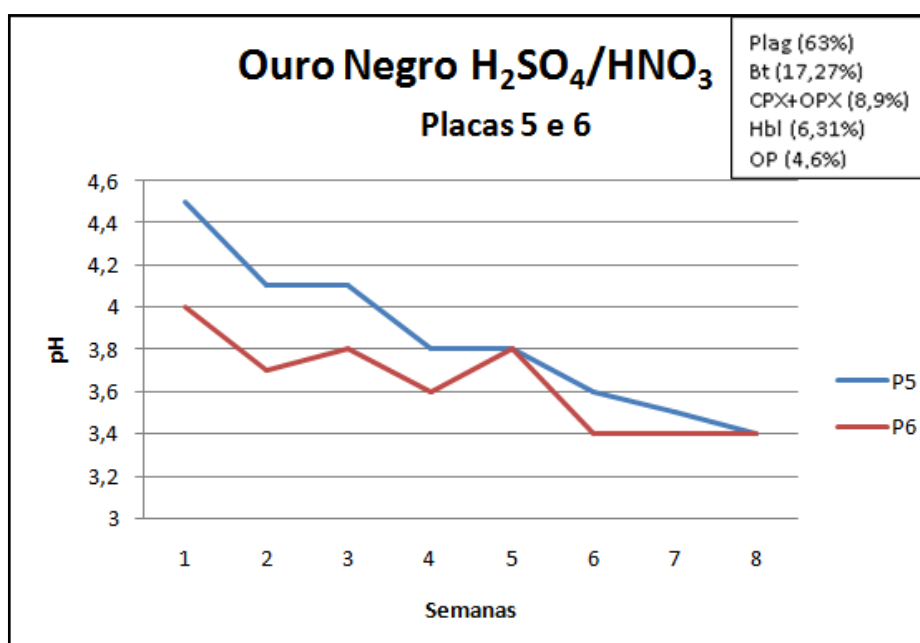


Figura 5.9 Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida ($\text{H}_2\text{SO}_4 / \text{HNO}_3$) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” Ouro Negro.

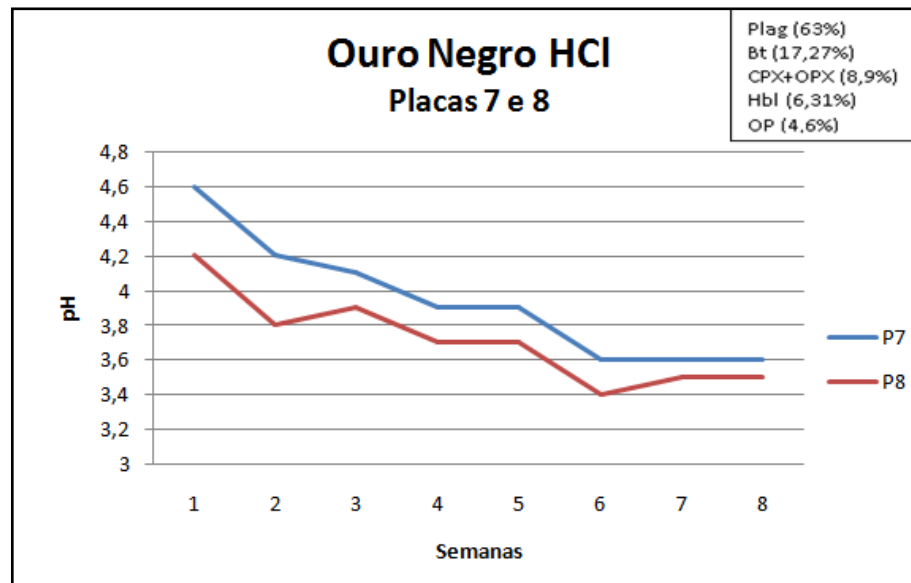


Figura 5.10 Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida (HCl) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” Ouro Negro.

Neste contexto, chama-se a atenção para o fato que quanto mais homogênea a composição modal da rocha testada, mais coincidentes serão suas curvas de regressão (Figuras 5.11, 5.12 e 5.13), sempre sendo guardada a ressalva das limitações do plano de observação composicional que uma lâmina delgada pode oferecer.

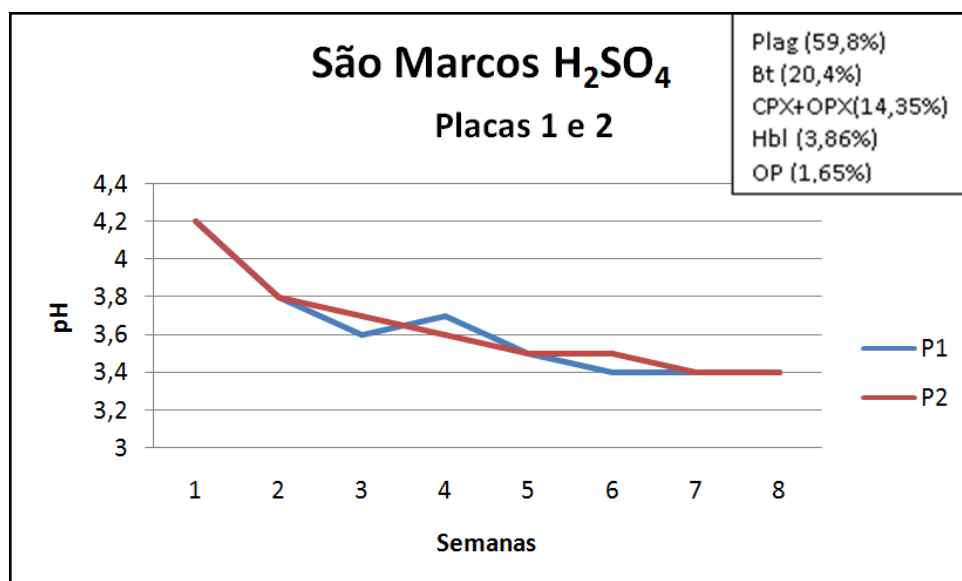


Figura 5.11 Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida (H₂SO₄) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” São Marcos.

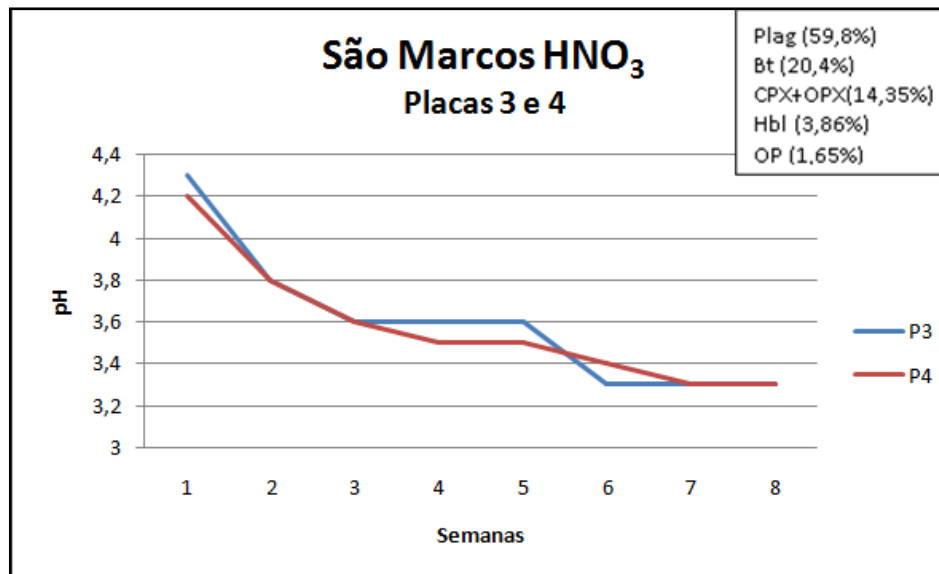


Figura 5.12 Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida (HNO_3) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” São Marcos.

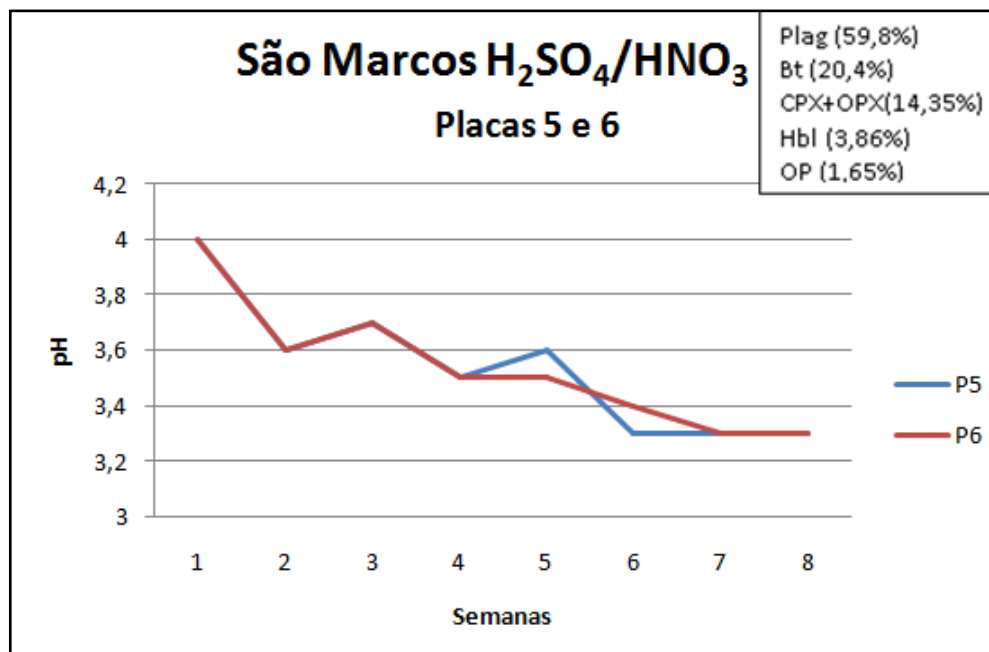


Figura 5.13 Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” São Marcos.

Considerada uma composição modal representativa, a expectativa é que os dados de pH da primeira semana sejam *grosso modo* iguais (Ver figuras 5.11, 5.12, 5.13) além de que se possa constatar significativa superposição entre seus valores ao longo das semanas sob diferentes ataques ácidos per si.

Os dados dos ensaios de alterabilidade acelerada, transpostos em diagramas de duas variáveis, revelam a depleção da rocha, com valores de pH em diminuição progressiva, com uma deflexão suavizada a partir da terceira para a oitava semana (Ver figuras 5.11, 5.12), portanto, configurando uma feição de caráter logarítmico.

Dentro desta tendência geral, o habitual é que o pH da solução ácida seja sempre descendente, até mesmo podendo se repetir em semana próxima subsequente. Este comportamento é decorrente do fenômeno de depleção natural seletiva em que os minerais mais susceptíveis aos ataques ácidos são minimizados ou mesmo suprimidos sequencialmente. Nas condições ocasionais de reversão de tendência (Ver figura 5.13) a explicação possível seria textural, em que o processo de ataque ácido tenha removido minerais que estejam protegendo outros minerais, estes últimos mais vulneráveis ao ataque ácido.

Este comportamento morfológico da curva de regressão seria típico de “granitos pretos” em que piroxênios têm participação significativa ($\geq 5\%$) na RT. Nestes casos, ao termo da primeira semana, a solução residual apresenta $\text{pH} \geq 4,0$ qualquer que tenha sido a solução ácida empregada (Ver figuras 5.7 a 5.13), podendo ocorrer exceção no caso de mistura $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$. Portanto, a performance destas soluções ácidas não é a mesma, apesar de ajustadas para um pH standard ($\text{pH} = 3$). Com efeito, no caso da mistura $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$ constata-se que quase sempre esta solução mostrou-se menos reativa que as demais soluções, na primeira semana (Tabela 5.2)

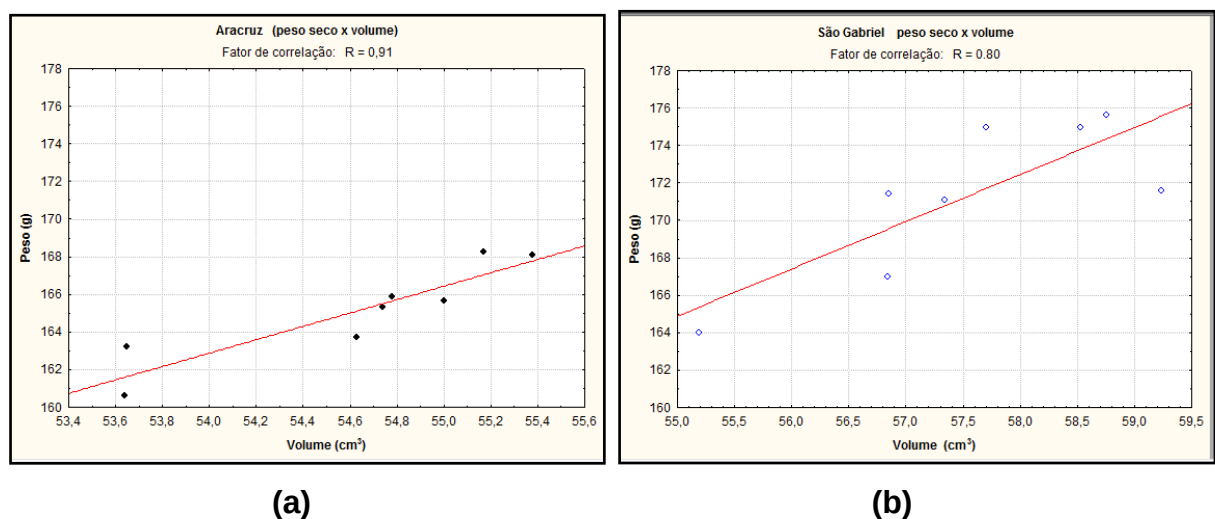
Tabela 5.2. Reatividade comparada das diversas soluções ácidas residuais, Relativa à primeira semana dos ensaios de alterabilidade acelerada, sobre diferentes “granitos pretos”, através de leituras de pH.

“Granito preto”	H_2SO_4	HNO_3	HCl	$\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$
Ouro Negro	4,2	4,3	4,2	4,0
	4,8	4,5	4,6	4,5
São Gabriel	4,1	4,1	4,0	3,7
	4,2	4,1	4,1	3,8
São Marcos	4,2	4,2	4,2	4,0
	4,2	4,3	4,3	4,0
Aracruz	3,6	3,5	3,5	3,5
	3,7	3,6	3,6	3,5

Diante desta perspectiva, não seria recomendado que as interpretações sobre presença ou ausência de piroxênios, na composição modal da rocha testada, sejam feitas com base em resultados de leituras de pH em soluções residuais da mistura $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$, isoladamente. Se a amostragem contiver elementos de mais de uma fácies do “granito preto” em análise, e se apenas uma destas fácies contiver piroxênios, os resultados serão certamente divergentes. Para cobrir este óbice é absolutamente necessário o controle estatístico das amostras (corpos de prova) em termos de seus volumes x peso seco.

Este critério se baseia no fato de que quanto maior for a reprodutibilidade da composição modal (pouca variação de composição mineralógica) mais positivo será o fator de correlação entre estas variáveis consideradas. Assim, para $R \geq 0,90$ (Figura 5.14a) pode-se considerar que a amostragem corresponde a uma só fácies e, conseqüentemente, nos ensaios de alterabilidade acelerada os resultados serão em princípio coerentes entre si, ou seja, com alta reprodutibilidade. Para valores de $R \leq 0,90$ e notadamente para $R \leq 0,80$ (Figura 5.14b) depreende-se que a amostragem contém mais de uma fácies da rocha a ser testada, e os resultados deverão revelar incoerências, ou seja, baixa reprodutibilidade. De modo que o controle estatístico inicial, precedendo os ensaios de alterabilidade acelerada, deve ser considerado uma prática rigorosamente recomendada.

Figura 5.14a, b Distribuição em *scatterplot* das relações entre volume do corpo de prova e o correspondente peso seco, relativa a “granitos pretos”, no caso de composição mineralógica mais ou menos constante (a) e de composição heterogênea: duas fácies (b)



Uma vez que a morfologia das variações de pH ao longo do tempo de ensaios de lixiviação sugerem um comportamento de regressão linear de 2º grau, o tratamento estatístico destes dados não somente é possível como recomendado. A feição predominante das morfologias de variações do pH, com uma deflexão em curso dos ensaios de lixiviação, recomenda a utilização de um tratamento por regressão logarítmica. Efetivamente, dispostos em diagramas cartesianos de duas variáveis, os parâmetros de pH x tempo delineiam regressões lineares de 2º grau, perfeitamente ajustáveis como logarítmicas.

Propõe-se como fator comparativo entre diferentes “granitos pretos” o tempo de registro (em semanas) do primeiro evento em que a solução ácida residual corresponda a $\text{pH} = 3$. Este evento, nos ensaios de bancada, não significa que a solução ácida “perdeu” sua capacidade reativa, mas simplesmente porque seu ataque, essencialmente pelicular, restringiu provisoriamente a paragênese mineral neste nível à presença de representantes de maior resistência à lixiviação. Nestas condições, o intervalo reativo adotado (7 dias) torna-se transitoriamente insuficiente para alterar o pH da solução ácida renovada. Vencida no todo, ou em parte, a resistência desta “película” do corpo de prova, a textura e composição mineral original da rocha voltam a ser consumidas pelo ataque ácido, tornando-se o $\text{pH} > 3$.

O delineamento morfológico das regressões lineares e o momento “T” em que atingem o valor de $\text{pH} = 3$ da ordenada, permitem as seguintes inferências sobre a previsão de vulnerabilidade da rocha testada aos efeitos do intemperismo químico:

- nível de alterabilidade da litologia testada;
- paragênese mineral principal do “granito preto” em termos das proporções relativas entre piroxênios-anfibólios-plagioclásios Ca;
- entre granitos pretos quais os mais vulneráveis ao intemperismo Químico;
- comparações entre vulnerabilidades relativas de “granitos pretos”.
- Índices como grau de alteração; densidade de microfissuras e relação entre grãos.

Os resultados obtidos (Tabela 5.3) são muito esclarecedores, não apenas no que concerne a resistência da rocha à lixiviação ácida. Adicionalmente, são obtidas indicações valiosas sobre a reprodutibilidade da composição modal e, conseqüentemente, a colocação em evidência de *fácies* distintas na amostragem em ensaio. Neste caso, estas informações podem ser definidas pelas regressões lineares, conforme os dados produzidos durante os ensaios de bancada, resultando em tempos bastante diferentes para o evento $\text{pH} = 3$.

Tabela 5.3 Sumário dos resultados de lixiviação ácida sobre granitos pretos, destacando os valores de “Tempo” para o primeiro evento de pH = 3.

Granito preto	Soluções ácidas	Placa	Equação	Tempo (semanas)
Aracruz	H ₂ SO ₄	1	$T = 3,6587 - 0,6231 \cdot \log_{10}(x)$	11,5
		2	$T = 3,6118 - 0,5851 \cdot \log_{10}(x)$	11
	HNO ₃	3	$T = 3,5172 - 0,4859 \cdot \log_{10}(x)$	11,5
		4	$T = 3,5609 - 0,5401 \cdot \log_{10}(x)$	11
	H ₂ SO ₄ / HNO ₃	5	$T = 3,4597 - 0,3859 \cdot \log_{10}(x)$	15,5
		6	$T = 3,4613 - 0,3671 \cdot \log_{10}(x)$	18
	HCl	7	$T = 3,5602 - 0,452 \cdot \log_{10}(x)$	17
		8	$T = 3,5337 - 0,4059 \cdot \log_{10}(x)$	20,5
Ouro Negro	H ₂ SO ₄	1	$T = 4,8199 - 1,3807 \cdot \log_{10}(x)$	20,5
		2	$T = 4,5762 - 1,1964 \cdot \log_{10}(x)$	20,5
	HNO ₃	3	$T = 4,2699 - 1,0333 \cdot \log_{10}(x)$	17
		4	$T = 4,4175 - 1,2247 \cdot \log_{10}(x)$	14
	H ₂ SO ₄ / HNO ₃	5	$T = 4,5262 - 1,1745 \cdot \log_{10}(x)$	20
		6	$T = 4,0012 - 0,6317 \cdot \log_{10}(x)$	38
	HCl	7	$T = 4,594 - 1,1403 \cdot \log_{10}(x)$	24,5
		8	$T = 4,1665 - 0,7886 \cdot \log_{10}(x)$	30
São Gabriel	H ₂ SO ₄	1	$T = 4,0984 - 0,8657 \cdot \log_{10}(x)$	18,5
		2	$T = 4,0217 - 0,8193 \cdot \log_{10}(x)$	17,5
	HNO ₃	3	$T = 4,0134 - 0,8266 \cdot \log_{10}(x)$	17
		4	$T = 4,0501 - 0,8686 \cdot \log_{10}(x)$	16
	H ₂ SO ₄ / HNO ₃	5	$T = 3,8135 - 0,5662 \cdot \log_{10}(x)$	27
		6	$T = 3,7502 - 0,4781 \cdot \log_{10}(x)$	37
	HCl	7	$T = 3,9234 - 0,6703 \cdot \log_{10}(x)$	23,5
		8	$T = 4,0520 - 0,8069 \cdot \log_{10}(x)$	20
São Marcos	H ₂ SO ₄	1	$T = 4,1272 - 0,8724 \cdot \log_{10}(x)$	19,5
		2	$T = 4,1329 - 0,8606 \cdot \log_{10}(x)$	20,5
	HNO ₃	3	$T = 4,2149 - 1,0681 \cdot \log_{10}(x)$	13,5
		4	$T = 4,1345 - 0,9719 \cdot \log_{10}(x)$	14,5
	H ₂ SO ₄ / HNO ₃	5	$T = 3,9628 - 0,7387 \cdot \log_{10}(x)$	20
		6	$T = 3,9558 - 0,7266 \cdot \log_{10}(x)$	20,5
	HCl	7	$T = 4,1407 - 0,8958 \cdot \log_{10}(x)$	18,5
		8	$T = 4,0987 - 0,8228 \cdot \log_{10}(x)$	21,5

Corpos de prova de uma mesma litologia e *fácies*, e com boa reprodutibilidade de composição modal, tendem a produzir regressões lineares praticamente de mesma morfologia, e atingem o primeiro evento de pH = 3 em tempos similares (Figuras 5.15 A e B), considerando-se uma lixiviação ácida de mesma natureza.

Figura 5.15 A - Equação de 2º Grau Log (ph x semanas) - ON

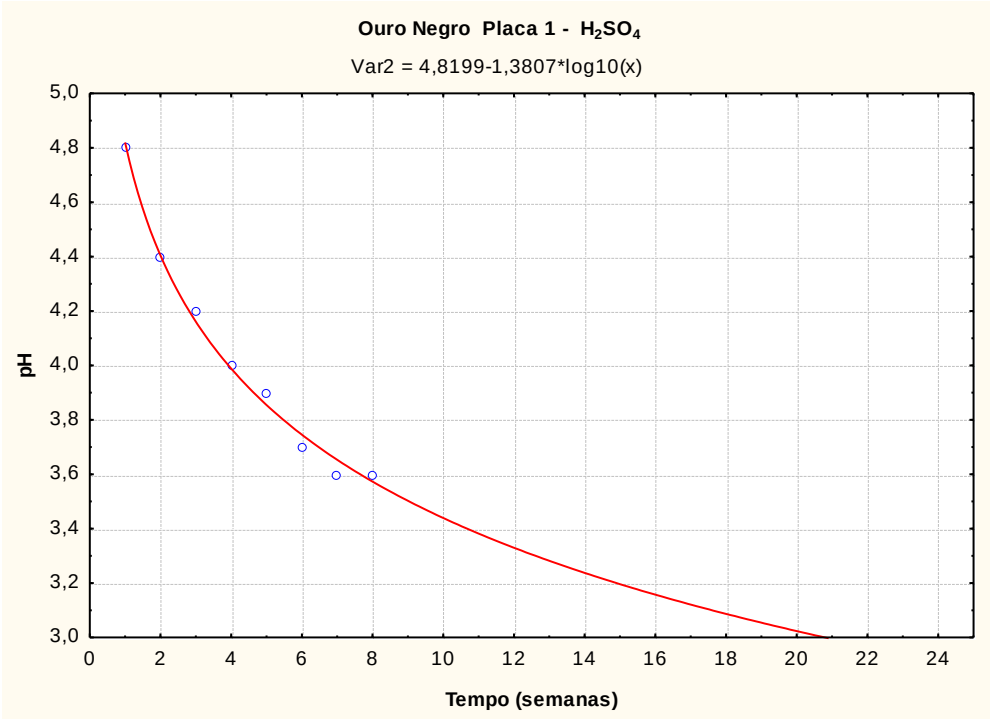
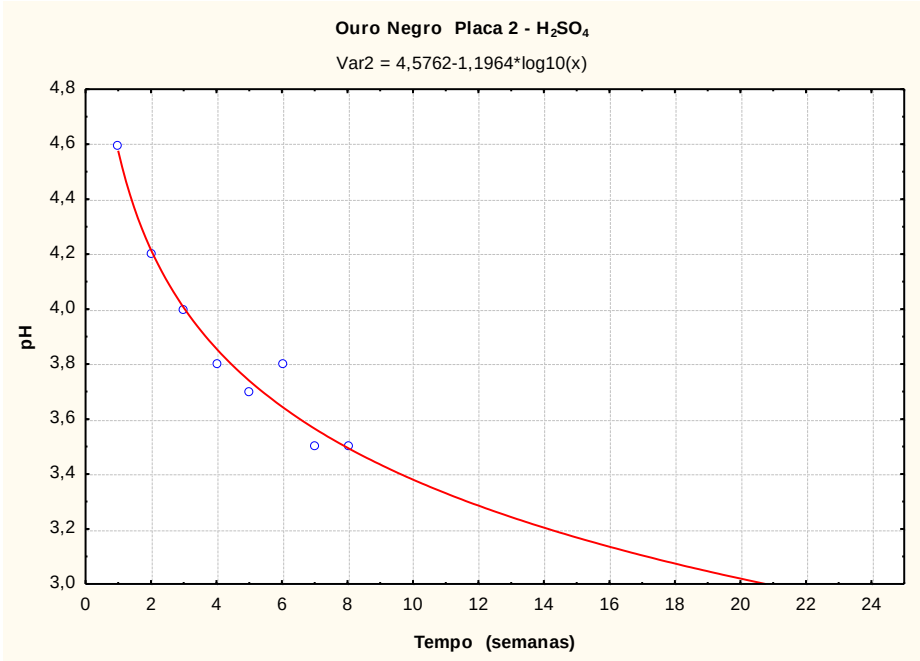


Figura 5.15 B - Equação de 2º Grau Log (ph x semanas) - ON



Corpos de prova de litologias diferentes, cujas composições modais são muito aproximadas, não importando a morfologia de suas regressões lineares, atingem em princípio o evento de $\text{pH} = 3$ em intervalos de tempo aproximados ou de mesma ordem de grandeza (Figuras 5.16 A e B).

Figura 5.16 A - Equação de 2º Grau Log (ph x semanas) - ON

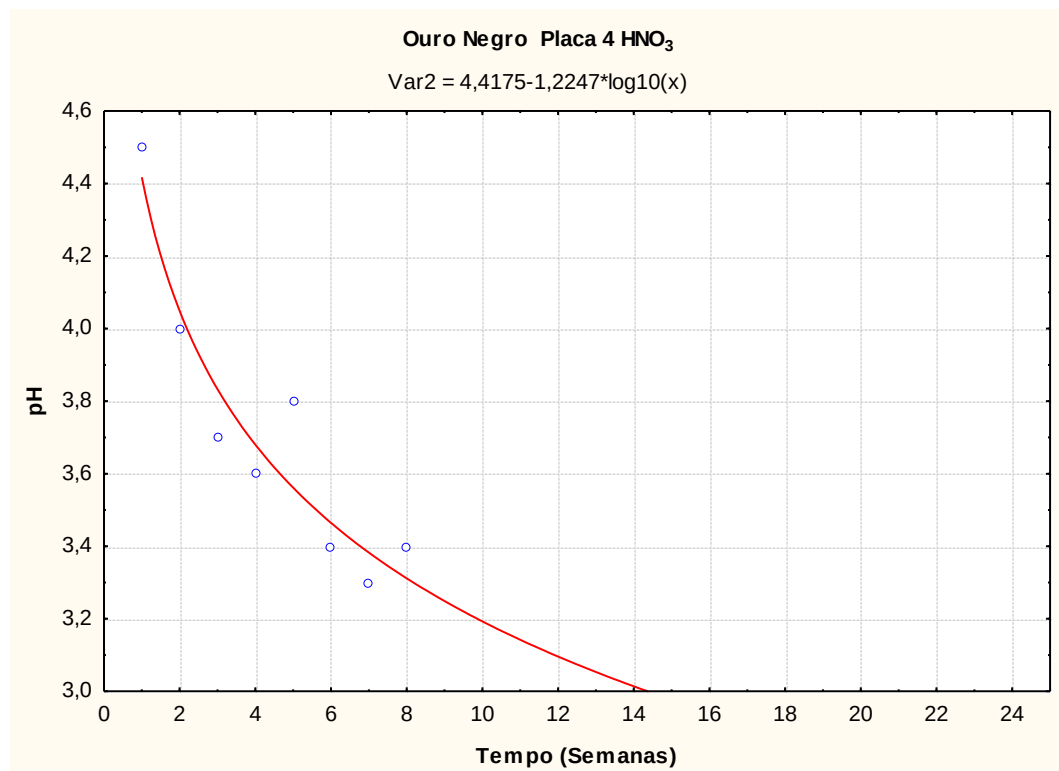
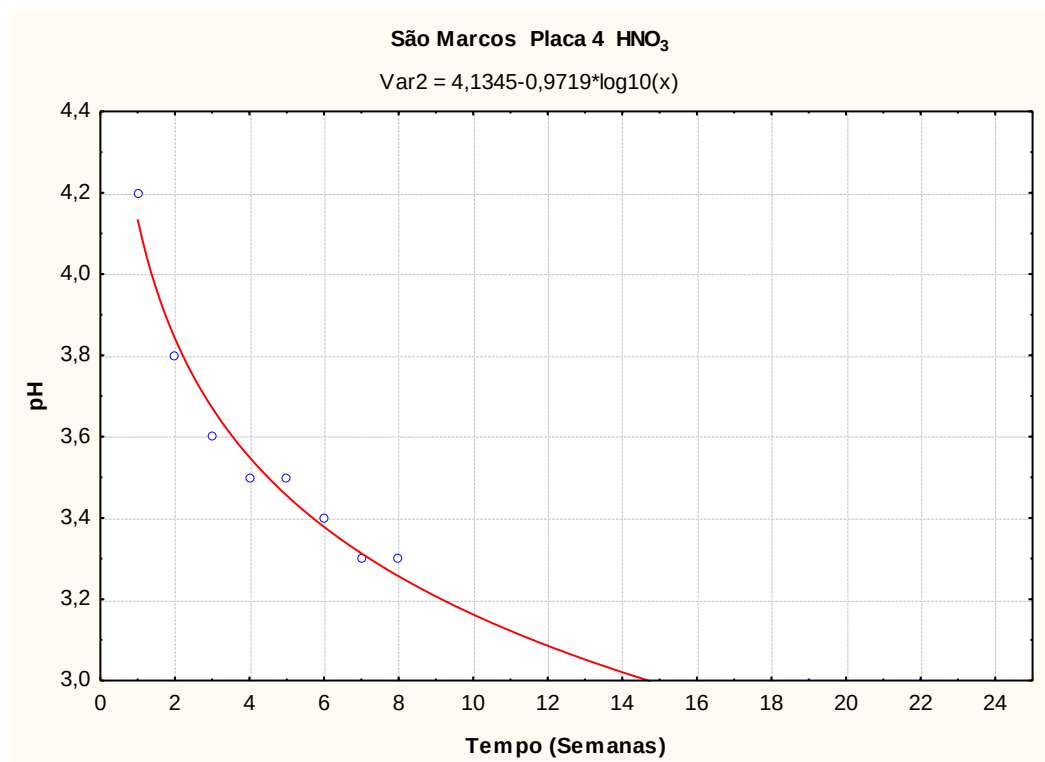


Figura 5.16 B - Equação de 2º Grau Log (ph x semanas) - PSM



Diferentes *fácies* de uma mesma litologia produzem regressões lineares díspares e atingem o evento de $\text{pH} = 3$ em intervalos de tempo marcadamente diferentes, quanto maiores forem as diferenças da composição modal destas *fácies* (Figuras 17 A e B).

Figura 5.17 A - Equação de 2º Grau Log (ph x semanas) - ON

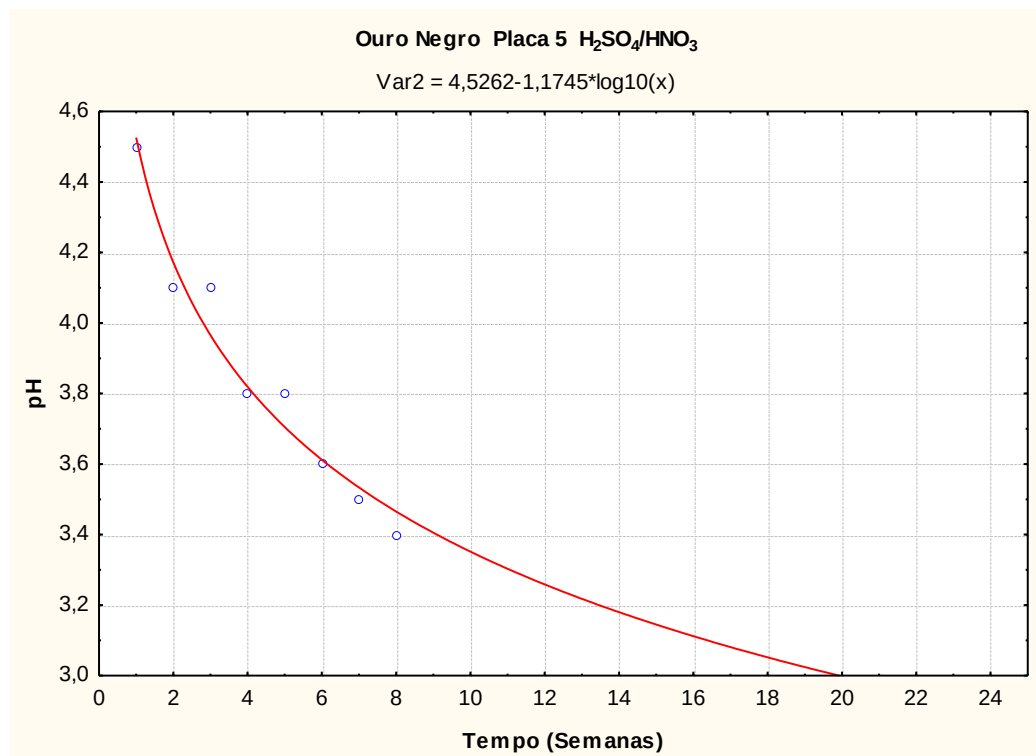
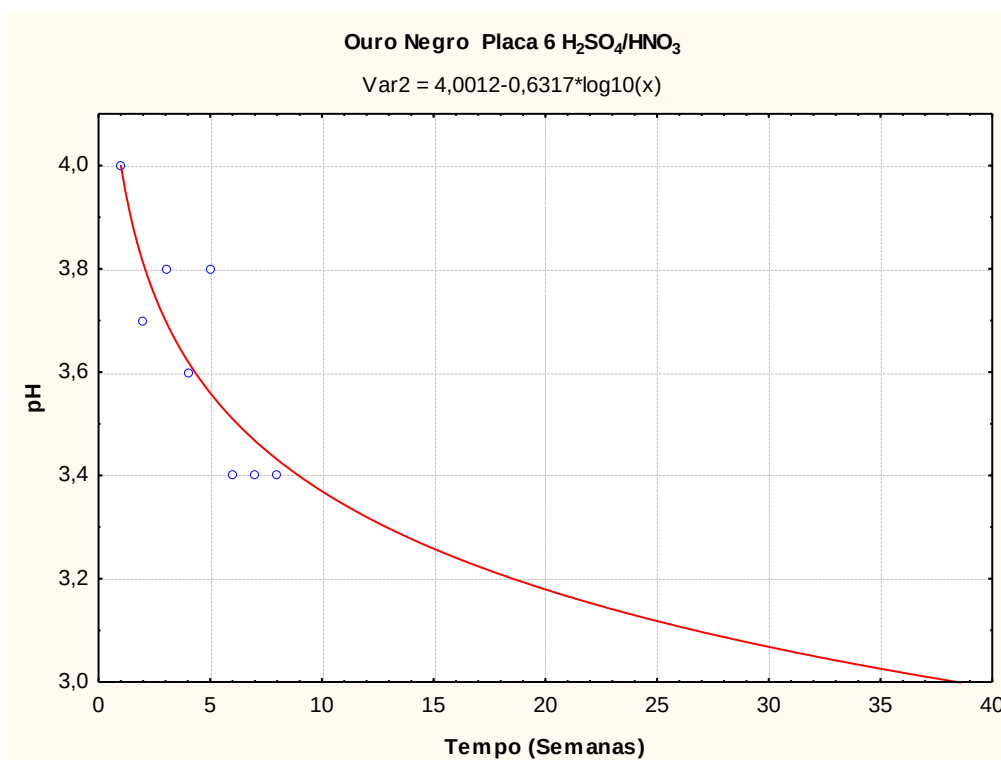


Figura 5.17 B - Equação de 2º Grau Log (ph x semanas) - ON



Não se dispõem ainda da possibilidade de transposição do valor “Tempo” desde os ensaios de bancada para as condições naturais de lixiviação de uma placa de revestimento aplicada, propõe-se que $T < 20$ semanas seja um índice restritivo à aplicação do produto testado, ou sua *facies* específica, em termos de revestimentos externos. Esta proposição é válida para ensaios com soluções de H₂SO₄ e HCl, principalmente o primeiro, uma vez que os resultados obtidos mostraram que a solução de HNO₃ mostrou-se a mais reativa, enquanto a mistura H₂SO₄/HNO₃ correspondeu muitas vezes àquela de menor reatividade (Ver Tabela 5.3).

5.3.3 Ensaios de brilho

O referido ensaio baseia-se na mensuração da perda de brilho exibida pelo material. Foram realizadas 27 medições desta propriedade em cada corpo de prova, utilizando-se um aparelho medidor de brilho, modelo IG-330-Gloss Checker, Sanwa Kenma, abrangendo-se todos os corpos de prova de cada um dos *facies* “comerciais”. Em seguida, estes corpos de prova foram submetidos aos ciclos de imersão, com diferentes soluções lixivantes, e em condições distintas de tempo de

imersão, obtendo-se assim os respectivos valores médios de brilho, para comparações. Para os 4 litotipos estudados (PSG, PSM, PAC e ON) foram testados 8 (oito) corpos de prova e para o Preto São Francisco 2 corpos de prova (dois).

A perda de brilho é um dos aspectos mais marcantes para o construtor porque suas consequências “saltam aos olhos”. Embora o efeito de proteção do revestimento não seja em princípio afetado pela perda do brilho, nem tão danoso quanto, por exemplo, a perda de massa, ele possui um efeito visual desagradável.

Nos ensaios efetuados, posto que os corpos de prova não foram produzidos necessariamente a partir de uma mesma placa serrada, e esta de um mesmo bloco, os valores iniciais de leitura podem ter diferenças marcantes (vide tabela 5.4). Corpos de prova de um determinado “granito preto”, feitos a partir de uma mesma placa lustrada, apresentam valores iniciais e finais de leituras de brilho com marcada diminuição mesmo quando próximas entre si, assim como configurações muitas vezes coincidentes em diagramas de duas variáveis: brilho x tempo (Figuras 5.18 e 5.19), nos quais encontram-se representadas as placas o desempenho das placas por suas respectivas soluções ácidas, conforme *op citado*. Assim sendo, as leituras iniciais de brilho entre os diversos “granitos pretos” testados não seriam necessariamente diferentes em função de composições mineralógicas distintas, mas sobretudo, dependentes da qualidade inicial do lustro industrial.

Figura 5.18 diagramas de duas variáveis: brilho x tempo – Ouro Negro

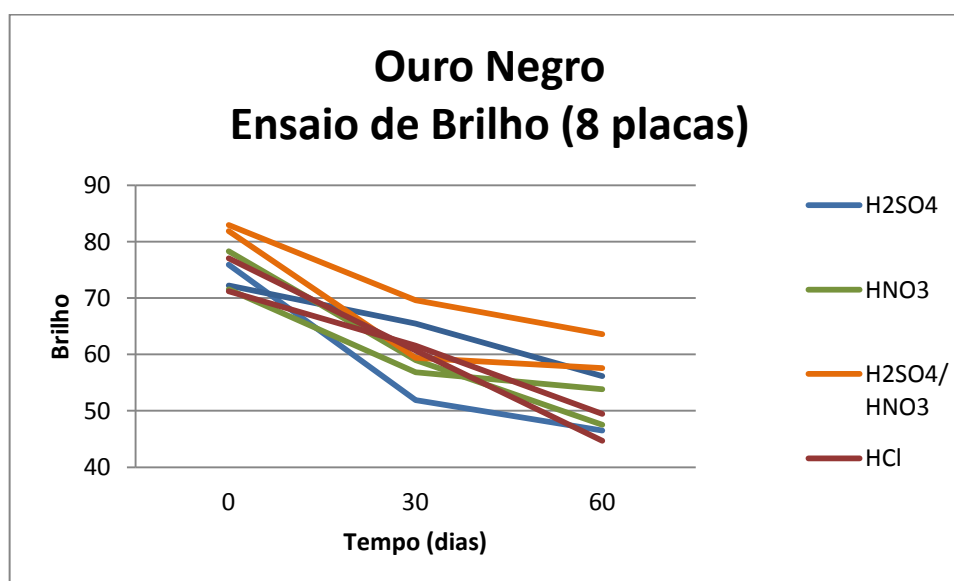
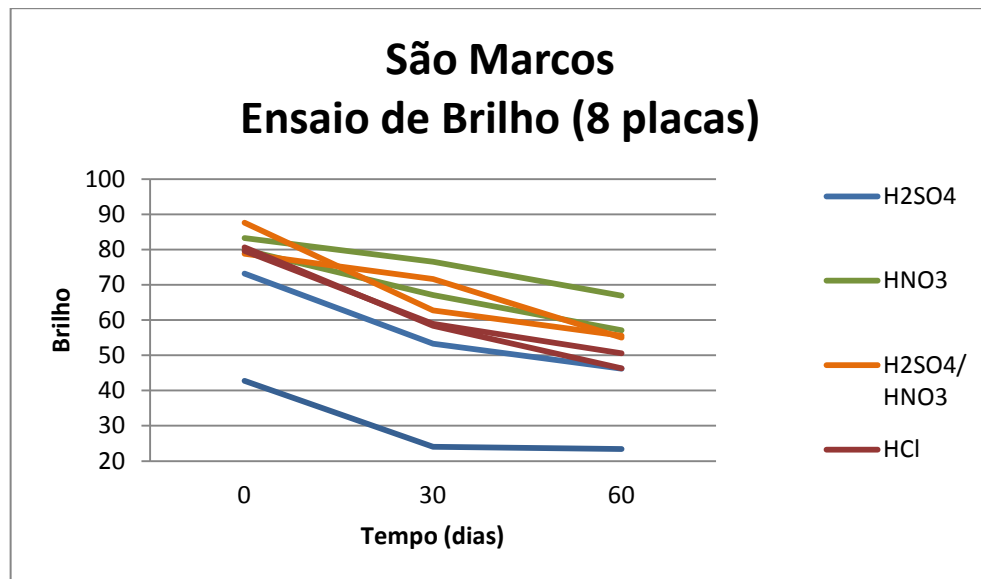


Figura 5.19 diagramas de duas variáveis: brilho x tempo – preto São Marcos



As leituras médias de brilho, apesar da malha de 27 pontos tomados em cada superfície lustrada de corpo de prova, podem ser razoavelmente bem diferenciadas caso a caso, considerando-se um mesmo “granito preto”. No presente estudo, seguindo-se os dispositivos usuais, foi adotado o valor médio de cada jogo de dois corpos de prova, por ensaio de solução ácida, e para cada “granito preto” testado (Tabela 5.4).

Tabela 5.4. Valores médios de perda relativa de brilho sobre corpos de prova (8 semanas), considerando-se soluções ácidas per si, e valores médios de perda relativa de brilho sobre o conjunto de placas/soluções ácidas, considerando-se os diversos granitos pretos testados.

Ácidos	Amostras			
	ON	SG	AC	SM
H ₂ SO ₄	38,8 22,3	18,3 22,5	24,5 25,5	36,8 45,3
Valor Médio (%)	30,6	20,4	25	41,1
HNO ₃	24,8 39,3	12,4 18,6	27 31,5	28,5 19,6
Valor Médio (%)	32,1	15,5	29,3	24,1
H ₂ SO ₄ /HNO ₃	29,7 23,1	11,3 21,2	25,8 34,3	30,2 36,5
Valor Médio (%)	26,4	16,3	30,1	33,4
HCl	30,5 42	13,3 42,2	32,9 38,4	42,6 36,5
Valor Médio (%)	37,8	27,8	35,7	39,6
Médias das Leituras (%) (todas as soluções ácidas)	31,7	20	30	34,6

Os resultados colocaram em evidência que:

- A perda relativa de brilho mostrou-se forte e geralmente mais acentuada no caso de ataque com solução de HCl. Esta constatação leva à inferência que granitos pretos têm seu brilho prejudicado em menor espaço de tempo quando o revestimento da edificação se situa em domínios da orla marítima;
- Considerados os valores médios de todos os ensaios de ataque ácido, pode-se admitir hipoteticamente uma perda de brilho $\leq 20\%$ ao termo de 8 semanas no caso de “granitos pretos”. No conjunto estudado, apenas o Preto São Gabriel atende esta exigência.

De uma forma geral, a disposição dos pontos das variáveis: brilho x tempo, em diagrama de duas variáveis, admite uma configuração de regressão de 1º grau.

Partindo-se da premissa de exigência de um brilho inicial mínimo e de uma perda relativa deste nível inicial até 30%, seria possível calcular o tempo necessário para que esta situação seja atendida em teste de bancada. Todavia esbarra-se, neste contexto, no problema de transposição desta informação em relação às expectativas de reprodutibilidade em condições “reais”, após a aplicação da placa pétrea.

5.3.4 Ensaios de gelo-degelo

Para o ensaio de gelo-degelo foram utilizadas as placas P.9 e P.10 de cada litotipo estudado. Com as placas acondicionadas em cubas com capacidade para 200 ml, foi feito ensaio de imersão total (citado acima). Em seguida essas placas são colocadas no freezer a -15° durante 18 horas, depois são retiradas e colocadas na bancada para descongelarem a temperatura ambiente (25°) durante 6 horas e assim sucessivamente durante um ciclo de 25 e 50 dias, onde ao final de cada ciclo são medidos seus índices físicos.

O ensaio de gelo-degelo é tipicamente esclarecedor sobre o intemperismo físico a que se submete uma placa de revestimento quando aposta. O contraste térmico nas condições em que os ensaios foram conduzidos (-15°C e $\approx 28^{\circ}\text{C}$) se insere na faixa climatológica que se estende do tropical ao temperado de inverno rigoroso. Este contraste submete a placa a uma perda gradual de massa, que é tanto mais constante quanto mais homogênea for a composição modal da rocha, e sobretudo quanto mais equigranular for a textura lítica. Rigorosamente, estas perdas, medidas em peso, são relativamente pequenas, poucas vezes ultrapassando 1000 mg/50 dias (Tabela 5.5). Neste caso, considerando-se os dois ciclos de 25 dias, e o peso seco inicial, os pontos da relação peso seco x tempo, em sistema cartesiano de duas variáveis, tendem a configurar uma rigorosa regressão linear de 1º grau (Figuras 5.20). Quanto maior for a semelhança entre a composição modal dos corpos de prova, mais próximas entre si as linhas de regressão que modelam seus respectivos comportamentos estatísticos e, sobretudo, ocorrendo inclinações semelhantes em relação ao eixo de $X = \text{tempo}$ (Figura 5.21).

Tabela 5.5. Relações entre peso seco de corpos de prova submetidos a ensaios de gelo-degelo, em dois ciclos de 25 dias.

Peso Seco para Gelo-degelo (g)					% perda relativa de peso
Material	Amostras	Tempo			
		T = 0	T = 25d	T = 50d	
Aracruz	9	164,35	164,17	164,00	0,35
	10	165,74	165,53	165,40	0,34
São Gabriel	9	170,71	170,65	170,65	0,06
	10	172,18	172,09	172,02	0,16
São Marcos	9	169,82	169,67	169,64	0,18
	10	169,17	168,99	168,96	0,21
Ouro Negro	9	141,48	141,32	141,25	0,23
	10	141,72	141,55	141,32	0,40
São Francisco	1	145,37	145,21	145,12	0,25
	2	147,15	146,98	146,90	0,25

Figura 5.20. Relações entre peso seco (g) de corpos de prova do Preto Aracruz em dois ciclos de 25 dias, submetidos a ensaios de gelo-degelo.

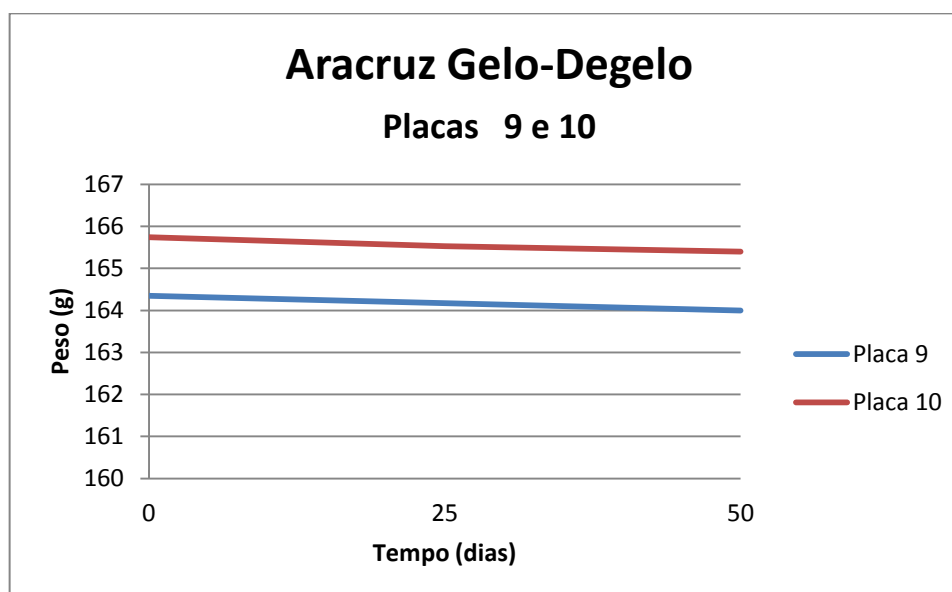


Figura 5.21. Relações entre peso seco (g) de corpos de prova do Preto São Marcos em dois ciclos de 25 dias, submetidos a ensaios de gelo-degelo.

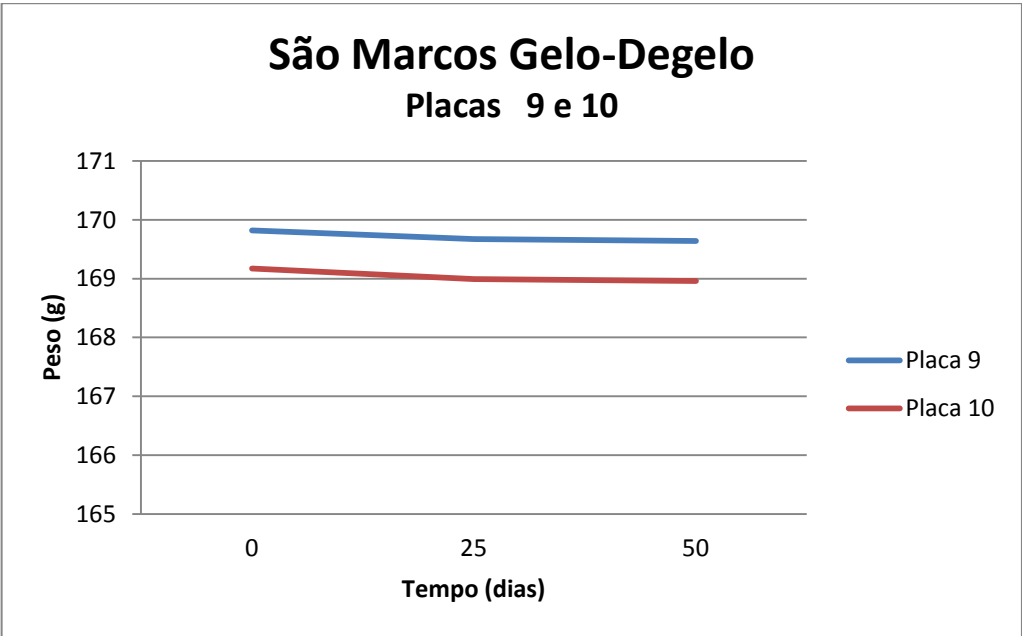
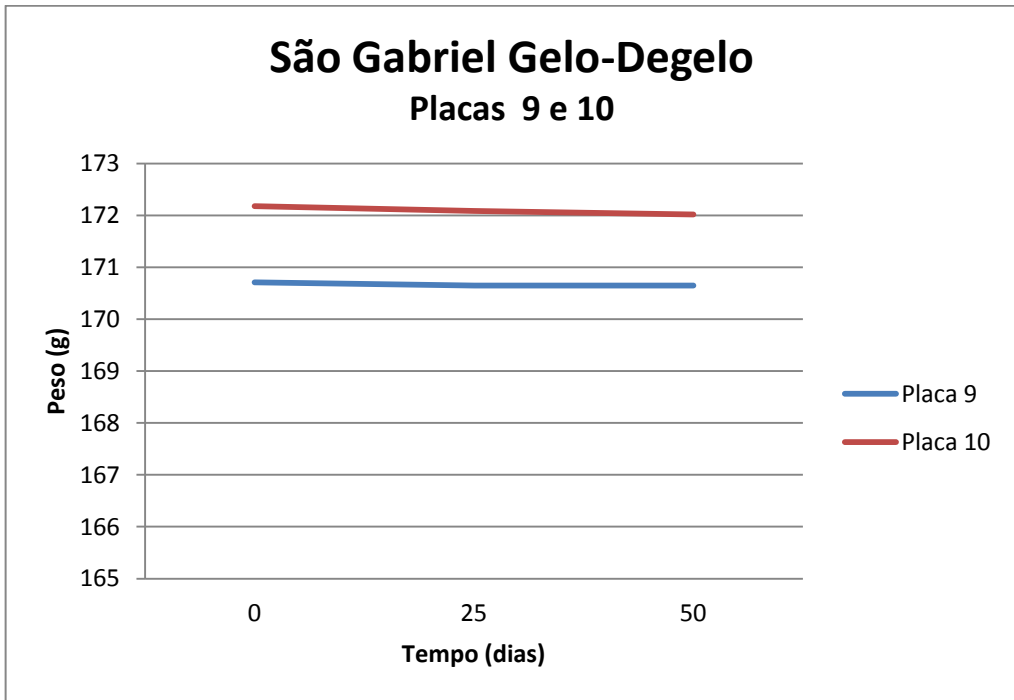
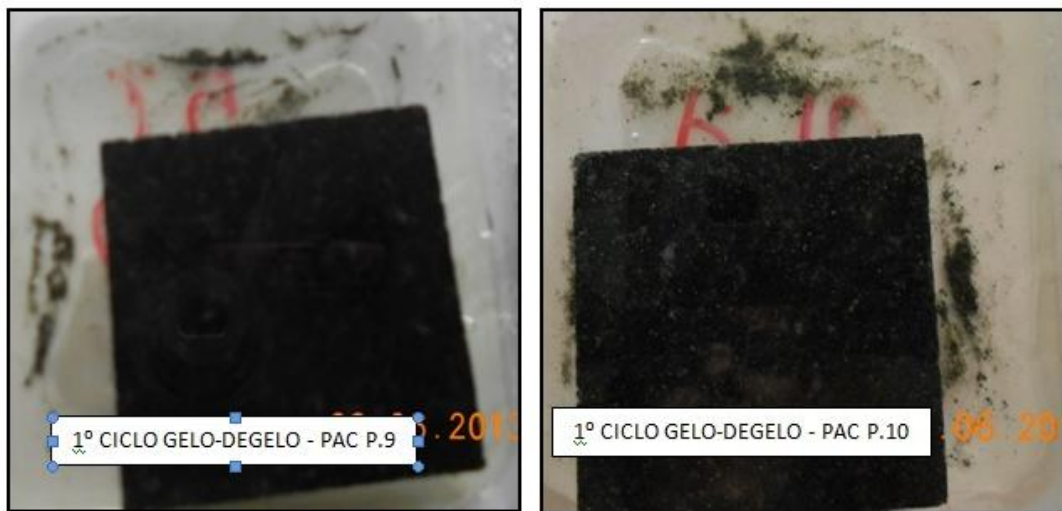


Figura 5.22. Relações entre peso seco (g) de corpos de prova do Preto São Gabriel em dois ciclos de 25 dias, submetidos a ensaios de gelo-degelo.



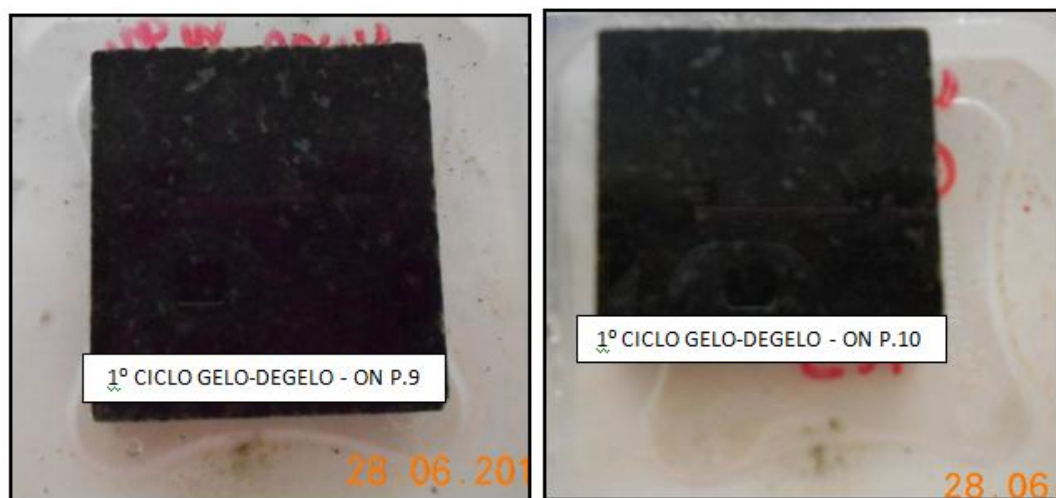
Em observação direta, estas perdas são em grande parte perceptíveis a olho nu (Figura 5.23 a, b), entretanto, não se deve olvidar que em muitos casos essas perdas podem ser de particulados com dimensões muito pequenas, até mesmo coloidais (Figura 5.23 c, d) e, portanto, fora do alcance da acuidade visual humana. Este é o caso do Ouro Negro, cuja perda real não deixa de ser claramente demonstrada pelo seu peso seco, pós-ensaio (Ver tabela 5.5)

Figura 5.23 (a, b) e (c, d). Aspectos de perda de massa de granitos pretos, sob ensaios de gelo-degelo, com particulados visualmente perceptíveis (a, b) e com particulados em grande parte com dimensões abaixo da acuidade visual humana (c,d).



(a)

(b)



(c)

(d)

PAC = Preto Aracruz

ON = Ouro Negro

Considerando-se as regressões lineares de 1º grau, é possível calcular o tempo de ensaio quando o peso original do corpo de ensaio terá sido completamente desagregado, pressupondo-se que o processo se mantenha durante todo esse tempo exibindo um comportamento constante.

Tabela 5.6. Avaliação da vida útil de placas de revestimento em granitos pretos selecionados, por regressão linear de 1º grau

Granito preto	Placa	Equação	X (Ciclos)	Tg	Tp	Tempo útil (construção civil): 1/2 Tp
Aracruz	9	$P = 164,52 - 0,175x$	940	64	230	115
	10	$P = 165,90 - 0,17x$	976	67	241	121
Ouro Negro	9	$P = 141,58 - 0,115x$	1231	84	302	151
	10	$P = 141,93 - 0,2x$	710	49	176	88
São Gabriel	9	$P = 170,73 - 0,03x$	5791	397	1429	715
	10	$P = 172,257 - 0,08x$	2153	148	533	267
São Marcos	9	$P = 169,89 - 0,09x$	1887	129	464	232
	10	$P = 169,25 - 0,105x$	1612	110	396	198

P = peso seco

X = tempo (ciclos de 25 dias)

Tg = Tempo global sobre o corpo de prova

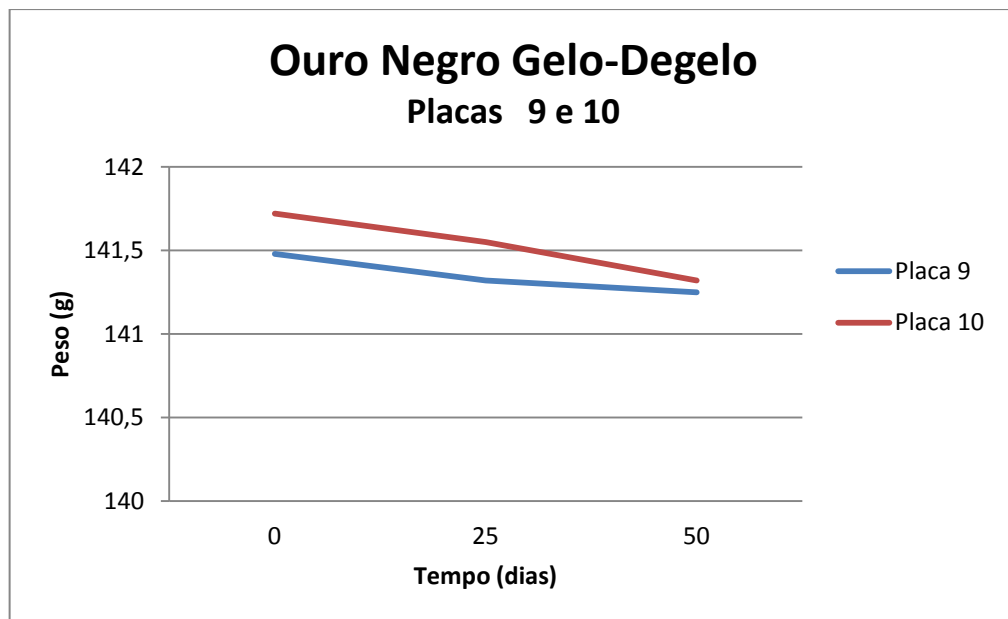
Tp = Tempo global sobre superfície da placa
(27,8% da superfície do corpo de prova)

Os resultados obtidos indicam o número de ciclos se considerarmos hipoteticamente a desagregação total do corpo de prova ($P = 0$ g), que é transformado em “tempo global” (anos), teoricamente necessário para desagregar inteiramente o corpo de prova. Enquanto o corpo de prova, com todas as suas faces, tem uma área total de 90 cm^2 , a superfície correspondente de uma placa, considerando-se aplicada como revestimento, representaria 27,8% da superfície total exposta no teste de bancada, ou seja, 25 cm^2 em 90 cm^2 . Assim, considerando-se uma placa de revestimento externo, os valores de Tg devem ser multiplicados pelo fator de 3,6 para cálculo de Tp. Como critério arbitrário, considera-se como “tempo útil” para cada caso de produto de revestimento a metade Tp, calculada nos ensaios de bancada.

Considerando-se o conjunto total dos resultados de gelo-degelo sobre o elenco de granitos pretos estudados, o São Gabriel é o produto indicado como de maior performance em relação ao intemperismo físico. Em contraposição, o Ouro Negro, mostra inquietante discrepância de resultados de “X”, além de uma indicação de

“tempo útil” inferior a 100 anos. A discrepância de valores obtidos indica que a jazida possui fácies com distintas respostas aos estresses físicos, além do risco de vida útil inferior ao que se espera para o tempo útil de uma edificação civil concretada (100 anos). Estas discrepâncias são previsíveis quando observados os resultados das duas variáveis dos dois corpos de prova testados, em diagrama (Figura 5.24).

Figura 5.24. Relações entre peso seco (g) de corpos de prova do Ouro Negro em dois ciclos de 25 dias, submetidos a ensaios de gelo-degelo.



CONCLUSÃO

Consideradas as normas de avaliação de rochas ornamentais conforme protocolos da ABNT é possível equacionar as previsibilidades das respostas destes produtos líticos aos diversos fatores físicos e químicos do intemperismo. No caso deste estudo, foram avaliados produtos denominados genérica e comercialmente como “granitos pretos”, brasileiros: Aracruz, Ouro Negro, São Gabriel e São Marcos. Os principais ensaios de bancada empregados e respectivos parâmetros foram: alterabilidade acelerada (tempo e pH), gelo-degelo (tempo e peso seco) e brilho.

Os resultados obtidos, planilhados, foram submetidos a tratamento estatístico, através de sistemas cartesianos de duas variáveis, que ofereceram as seguintes respostas:

- A) Os ensaios de alterabilidade acelerada, conduzidos ao longo de 8 semanas, com corpos de prova dos distintos granitos pretos, submetidos a ataques particulares de soluções ácidas de H_2SO_4 , HNO_3 , mistura $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$ e HCl , com $\text{pH} = 3$, resultaram em regressões lineares de 2º grau.
- B) Os ensaios de gelo-degelo, conduzidos em dois ciclos de 25 dias, resultaram em regressões lineares de 1º grau.

No caso da alterabilidade acelerada, não importando qual o tipo de solução ácida utilizada no ensaio, ainda é a Série de Bowen o principal fator que regula a vulnerabilidade dos minerais, conforme as condições físico-químicas que ditam a precedência destes minerais na cristalização fracionada de um magma intrusivo. Neste contexto, a perda do brilho é, certamente, a propriedade de maior percepção pela visão humana.

Os ensaios de lixiviação conduzidos sobre os tipos de “granito preto”, aqui testados, indicaram que placas do Aracruz não são recomendadas para utilização em revestimentos externos. Em outra via, chama-se a atenção que a variedade Ouro Negro possui *facies* distintas, uma delas adequada e outra decididamente não adequada para a produção de placas de revestimento.

No caso de gelo-degelo, apesar de perdas aparentemente insignificantes, quase sempre da ordem de algumas centenas de miligramas ao termo do segundo ciclo (50 dias), as consequências sobre placas pétreas podem ser desastrosas, quando a aplicação for feita em domínios climáticos de clima temperado com invernos rigorosos. Os diferentes resultados obtidos nos ensaios de diferentes granitos pretos parecem mais dependentes de condições texturais do que da própria composição modal.

O tratamento estatístico permite um “cálculo de tempo útil” sobre corpos de prova, em ensaios de bancada, com o estabelecimento de níveis críticos de resistência ao intemperismo físico e químico, visando-se a aplicabilidade de produtos líticos como revestimento externo de edificações. Arbitrariamente, este nível crítico é proposto teoricamente para 100 anos, considerando-se a expectativa de vida útil de corpos de prova testados.

Com base nos ensaios realizados, do ponto de vista da resistência ao intemperismo físico os “granitos pretos” mostraram boas performances, especialmente o São Gabriel. Em contraste, o Ouro Negro apresentou resultados discrepantes e inclusive inquietantes (Tempo útil < 100 anos), indicativo de existência de diferentes fácies neste corpo intrusivo, uma delas não recomendável para aplicação como revestimento externo em condições de climas temperados com inverno rigoroso.

A representatividade da amostragem a ser testada permanece sendo um problema básico, porém costumeiramente negligenciado, que afeta a validade da avaliação de rochas ornamentais, especificamente na produção de laudos técnicos. Esta contingência pode produzir não apenas conclusões contraditórias como restritivas para recomendações de aplicabilidade de elementos líticos destinados a revestimentos externos.

No cerne desta questão estão as evidências já demonstradas que a isotropia não é uma propriedade absoluta de corpos líticos, notadamente os intrusivos, em razão da sua própria dinâmica de *mise en place* na crosta e em decorrência do fracionamento cristalográfico do magma, regido por pressão e temperatura diferenciando-se no tempo e no espaço. Notadamente no caso do “granito Ouro Negro”, este estudo evidenciou que tais diferenças, caracterizando *facies* distintas, podem constituir partes do domínio de uma rocha intrusiva em lavra não recomendáveis à produção de placas destinadas a revestimentos externos.

A proposta desta metodologia por tratamento estatístico dos resultados possui a vantagem de não depender da subjetividade de avaliações do “nível de alteração” de minerais, em microscopia óptica, fator este presente e influente na avaliação da alterabilidade de litologias em vários outros métodos propostos na literatura. Além disto, o método é simples por ser essencialmente matemático, diferindo de

formulações elaboradas e complexas para aplicação em avaliações, em grande parte de outros métodos propostos na literatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, 1992. Rochas para revestimento. Determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente. Rio de Janeiro, *Ass. Brasil. Normas Técnicas*, Norma NBR 12766/92, 8 p.
- ABNT, 1992a. Rochas para revestimento – análise petrográfica. Rio de Janeiro, *Ass. Brasil. Normas Técnicas*, Norma NBR 12768/92, 8 p.
- ABNT, 1992b. Rochas para revestimento – determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente. Rio de Janeiro, *Ass. Brasil. Normas Técnicas*, Norma NBR 12766/92, 8 p.
- ABNT, 1992c. Rochas para revestimento – determinação da resistência à compressão uniaxial. Rio de Janeiro, *Ass. Brasil. Normas Técnicas*, Norma NBR NBR 12767/92.
- ABNT, 1992d. Materiais inorgânicos. Determinação do desgaste por abrasão. Rio de Janeiro. *Ass. Brasil. Normas Técnicas*, Norma NBR 12042/92.
- 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*, 590 p.
- ALMEIDA ET AL., 1967. Comparações geoquímicas entre granitóides do domínio da zona transversal, nordeste do Brasil.

- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. Províncias Estruturais Brasileiras. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 1977. Campina Grande. Núcleo Nordeste, 1977, 497p. (Boletim Núcleo Nordeste da SBG, 6) p. 363-391
- ANDREWS J.E., BRIMBECOMBLE P., JICKELLS T.D., LISS P.S., 1996. An Introduction to environmental chemistry. London, *Blackwell Sci.*, 202 p.
- 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. Salvador, SBG, In: Anais I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais, p. 13-19.
- BAIRD C., 2005. Química ambiental. Porto Alegre, *Ed. Bookman*, 650 p. 2ªed.
- BAIRD C. & CANN M., 2011. Química ambiental. Porto Alegre, *Ed. Bookman*, 795 p.
- BECERRA-BECERRA, J.E & COSTA A.G., 2003. Procesos de alterabilidad em granitos ornamentales brasileños. Diagnósticos y técnicas de evaluación. Medellín, Colombia, Soc. Colomb. Geol., In Memorias IX Congr. Colombiano Geología, p. 275-278.
- BECERRA-BECERRA, J.E & COSTA A.G., 2005. Avaliação do grau de oxidabilidade de rochas graníticas com aplicação ornamental. Rio de Janeiro, *CETEM*, In: Anais Primeiro Congresso Internacional de rochas ornamentais (CD-ROM).
- BECERRA-BECERRA, J.E & COSTA A.G., 2007. Ensaio de alteração acelerada para avaliação da durabilidade de seis granitos ornamentais brasileiros. *Geonomos*, **15(2)**: 33-42. p
- BILAL, E; HORN, H; NALINI JR; H.A CORREIA NEVES, J; MELLO, F.M., 2013. Evolução magmática dos granitoides proterozóicos do setor setentrional da

Província estrutural Mantiqueira, Minas Gerais, Espírito Santo. *Geonomos* 8(1) 77-86 p.

CAMPOS NETO, M.C & FIGUEIREDO, M.C.H (1995) – A orogênese Rio Doce, *In* X-VII. Cong. Bras. Geol., Bol. Res. Exp....SBG/SP, São Paulo p. 276-277.

CHIODI FILHO C., 2007. Conheça as Rochas Ornamentais. *Kistemann & Chiodi Assessoria e projetos*. Disponível em: http://www.abirochas.com.br/rochas_ornamentais.php>. Acesso em: 02 out. 2012.

CHIODI FILHO C.A., 2008. Diversidade das rochas ornamentais: Critérios de especificação e aplicação em revestimento. Porto Alegre, *ExpoAcabamento – Feira da Indústria de Materiais para Acabamento*.

STRECKEISEN, A. L. 15. 1976. Classification of the common igneous rocks by means of their chemical composition: A provisional attempt. *Neues Jahrbuch fur mineralogy, Monatshefte*, v.1,p.1-

DANTAS, E. L. *ET AL*. Archean accretion in the São José do Campestre massif, Borborema Province, northeast Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, [S.l.], n. 28, p. 221-228, 1998.

DIONÍSIO A., AIRES-BARROS L., BASTO M.J., 2004. *A degradação das rochas do patrimônio cultural construído: o caso das rochas carbonatadas*. Lisboa, *Boletim Soc. Portug. Química*, **93**: 61-68.

FRASCÁ M.H.B.O., 2003. Estudos Experimentais de Alteração Acelerada em Rochas Graníticas para Revestimento. São Paulo, USP, Tese de Doutorado, 218 p

FRAZÃO E.B., FARJALLAT J.E.S., 1995. Seleção de pedras para revestimento e propriedades requeridas. São Paulo, *Rev. Rochas de Qualidade*, 1 (124):18

- FREIMAN S.W. & SWANSON P.L., 1990. Fracture of polycrystalline ceramics. *In: Deformation processes in mineral, ceramics and rocks (Chapter 3)*. D.J. Barder & P.G. Meredith (Eds.), p. 72-83.
- GOMES M.A & SILVA Y. M. P., 2011. Geologia da Região de Colatina - ES. Monografia – UFMG.
- GOLDICH S., 1938. A study in rock weathering. *Journal of Geology*, **46**: 17-58.
- GUIMARÃES I.P., 2008. Geologia da Folha Solânea: SB.25-Y-A-IV. Programa Geologia do Brasil – Levantamentos Geológicos Básicos. Escala. 1:100.000. CPRM.
- MEYER, A.P; ARTUR; A.C.; CABANAS, F.N. 2003. Principais fatores petrográficos condicionantes da resistência ao ataque químico em rochas de revestimento. *In: Simp. Rochas Ornamentais do Nordeste, Fortaleza-Ceará, Anais*, **4**:153-164.
- MENDES V.A., 2003. Relação entre os eventos geológicos e a formação dos jazimentos de rochas ornamentais. São Paulo, *Revista Rochas de Qualidade*, **Nº 169**: p 165-171.
- MENDES V.A.; SOUZA J.C, LIMA M.A.B, 2010. Importância da Suíte Máfica Precoce da Província Borborema na Geração de Jazimentos de Rochas Ornamentais. Cong. Bras. Rochas Ornamentais.
- KARNIOL, T. R. & MACHADO, R. (2004): Análise geométrica e cinemática de um segmento na região do Baixo Rio Doce entre Aimorés (MG/ES) e Colatina (ES). *Revista Brasileira de Geociências*. 34(3): 373-382, setembro de 2004.
- NASA, 2013. Glossary on acid rain. Washington, *NASA Earth Observatory*.
- NASCIMENTO, M. A. L. Petrologia do magmatismo tardi-brasiliano no maciço São José do Campestre - RN/PB com ênfase no Plúton Alcalino Caxexa.

2000. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande Norte, 2000.

NAVARRO F.C., 2002. Caracterização petrográfica como técnica para a previsão do comportamento físico e mecânico de “granitos” ornamentais. Rio Claro, UNESP/IGCE, Dissertação de Mestrado, 88 p.

OLLIER C. W., 1984. Weathering. New York, Longman Ed., 270 p. (2th Ed.).

RODRIGUES E.P., COUTINHO J.M.V., CHIODI FILHO C., 1996. Petrografia microscópica: uma visão do passado, presente e futuro da rocha ornamental. São Paulo, Rev. Rochas de Qualidade, Nº 127: 80-84.

ROLIM FILHO J. L., SOUZA J. C., BARBOSA B. L., BARROS M. L. C., OLIVEIRA F. M. C., 2005. *Ensaio tecnológicos para aplicação de rochas ornamentais. Recife, Soc. Brasil. Geol., In V Simp. Rochas ornamentais Nordeste, p. 218-224.*

SANTOS, E. J.; MEDEIROS, V. C. Constraints from granitic plutonism on proterozoic crustal growth of the transverse zone Domain, Borborema Province, NE Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRANITES AND ASSOCIATED MINERALIZATIONS - ISGAM, 2, 1997, Salvador. 335p. p.237 - 239.

SIAL, A.N. Granitic rocks of Northeast Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRANITES AND ASSOCIATED MINERALIZATIONS - ISGAM, 1, 1987, Salvador. *Extended abstracts and program*. Salvador: Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, 1987. 298p. il. p.61-69.

SILVA M. E., 2007. Avaliação da Susceptibilidade de Rochas Ornamentais e de Revestimentos à Deterioração – Um enfoque a partir do estudo em monumentos do Barroco Mineiro. Belo Horizonte, UFMG, Tese Dout., 180 p.

- ULBRICHT H.H., VLACH S.R.F., VALDECIR A., 2001. O mapeamento faciológico em rochas ígneas plutônicas. São Paulo, *Rev. brasil. Geociências*, **31** (2):163-172.
- VUTIKURI V.S., LAMA R.D., SALUJA, S.S. 1974. Handbook on mechanical properties of rocks - Testing Techniques and Results (Vol. 1). Clausthal, 280p.
- VIDAL, F.W.H., BESSA, M. F., LIMA, M.A.B. 1999. Avaliação de rochas ornamentais do Ceará através de suas características tecnológicas. CETEM/MCT, Série Tecnologia Mineral 76, 30p.
- VIDAL F. W. H., 1995. *A indústria Extrativa de Rochas Ornamentais no Ceará*. São Paulo, Escola Politécnica USP, Diss. Mestrado, 178 p.
- WERNICK E., 2004. Rochas Magmáticas – Conceitos e classificação modal, química, termodinâmica e tectônica. São Paulo, *Editora Unesp*, 653 p.
- YOSHIDA, R. 1972. Contribuição ao conhecimento de características tecnológicas de materiais rochosos. São Paulo, *USP-IG*, Tese de Doutorado, 220 p.

ANEXOS

- ANEXO I:** Tabelas de índices físicos dos ensaios de alterabilidade acelerada e gelo-degelo
- ANEXO II:** Gráficos ph x semanas
- ANEXO III:** Tabela de ph das soluções ácidas para cada material
- ANEXO IV:** Fotos de alterabilidade dos litotipos estudados
- ANEXO V:** Gráficos Equação de 2º grau log (ph x semanas)
- ANEXO VI:** Diagramas de duas variáveis: brilho x tempo dos litotipos estudados
- ANEXO VII:** Tabela da composição modal
- ANEXO VIII:** Fotomicrografia dos litotipos estudados
- ANEXO IX :** Tabela de medição das placas para todos os materiais
- ANEXO X:** Resultados dos valores médios dos ensaios de brilho (n= 27 medições) dos litotipos estudados, em diferentes tempos de distintos ataques ácidos.
- ANEXO XI:** Resultados de percentual de perda dos litotipos estudados ao final dos 2 ciclos do ensaio gelo-degelo.
- ANEXO XII:** Fotos do ensaio de gelo-degelo 1º ciclo todos os litotipos estudados.
- ANEXO XIII:** Tabela de análises químicas.

ANEXO I

TABELAS DE ÍNDICES FÍSICOS DOS ENSAIOS DE ALTERABILIDADE ACELERADA E GELO-DEGELO

Índices Físicos antes dos ensaios São Gabriel							
Amostras	Peso Submerso (C)	Peso Saturado (B)	Peso Seco (A)	Massa Específica Aparente Seca	Massa Específica Aparente Saturada	Porosidade Aparente	Absorção da Água Aparente
1	117,29	175,12	174,97	3,025592	3,028186	0,259381	0,085729
2	117,79	175,16	174,97	3,049852	3,053164	0,331184	0,108590
3	118,06	175,80	175,62	3,041566	3,044683	0,311742	0,102494
4	115,23	171,57	171,40	3,042244	3,045261	0,301739	0,099183
5	114,69	171,23	171,07	3,025646	3,028475	0,282985	0,093529
6	115,21	171,74	171,56	3,034849	3,038033	0,318415	0,104920
7	112,14	167,17	167,01	3,034890	3,037798	0,290750	0,095803
8	110,04	164,16	164,02	3,030673	3,033259	0,258684	0,085355
9	114,42	170,87	170,71	3,024092	3,026926	0,283437	0,093726
10	115,80	172,34	172,18	3,045278	3,048108	0,282985	0,092926

Índices Físicos após ensaios de 30 dias São Gabriel							
Amostras	Peso Submerso (C)	Peso Saturado (B)	Peso Seco (A)	Massa Específica Aparente Seca	Massa Específica Aparente Saturada	Porosidade Aparente	Absorção da Água Aparente
1	117,26	175,09	174,84	3,023344	3,027667	0,432302	0,142988
2	117,77	175,08	174,82	3,050427	3,054964	0,453673	0,148724
3	118,04	175,74	175,49	3,041421	3,045754	0,433276	0,142458
4	115,21	171,54	171,27	3,040476	3,045269	0,479318	0,157646
5	114,67	171,19	170,93	3,024239	3,028839	0,460014	0,152109
6	115,18	171,69	171,43	3,033622	3,038223	0,460096	0,151665
7	112,12	167,12	166,89	3,034364	3,038545	0,418182	0,137815
8	110,03	164,15	163,91	3,028640	3,033075	0,443459	0,146422
9	114,42	170,87	170,65	3,023029	3,026926	0,389725	0,128919
10	115,80	172,34	172,09	3,043686	3,048108	0,442165	0,145273

Índices Físicos após ensaios de 60 dias São Gabriel							
Amostras	Peso Submerso (C)	Peso Saturado (B)	Peso Seco (A)	Massa Específica Aparente Seca	Massa Específica Aparente Saturada	Porosidade Aparente	Absorção da Água Aparente
1	117,23	175,04	174,77	3,023179	3,027850	0,467047	0,154489
2	117,73	175,01	174,74	3,050628	3,055342	0,471369	0,154515
3	118,00	175,68	175,42	3,041262	3,045770	0,450763	0,148216
4	115,16	171,47	171,19	3,040135	3,045107	0,497247	0,163561
5	114,64	171,14	170,87	3,024248	3,029027	0,477876	0,158015
6	115,15	171,63	171,37	3,034171	3,038775	0,460340	0,151719
7	112,11	167,09	166,84	3,034558	3,039105	0,454711	0,149844
8	110,00	164,08	163,83	3,029401	3,034024	0,462278	0,152597
9	114,40	170,85	170,56	3,021435	3,026572	0,513729	0,170028
10	115,80	172,31	172,02	3,044063	3,049195	0,513184	0,168585

Índices Físicos antes dos ensaios São Marcos							
Amostras	Peso Submerso (C)	Peso Saturado (B)	Peso Seco (A)	Massa Específica Aparente Seca	Massa Específica Aparente Saturada	Porosidade Aparente	Absorção da Água Aparente
1	110,81	168,63	168,48	2,913871	2,916465	0,259426	0,089031
2	111,98	170,46	170,28	2,911765	2,914843	0,307798	0,105708
3	111,39	169,33	169,20	2,920262	2,922506	0,224370	0,076832
4	110,55	168,03	167,90	2,921016	2,923278	0,226166	0,077427
5	110,23	167,45	167,31	2,923978	2,926424	0,244670	0,083677
6	113,29	171,88	171,74	2,931217	2,933606	0,238949	0,081519
7	110,91	168,61	168,48	2,919931	2,922184	0,225303	0,077160
8	106,14	161,61	161,45	2,910582	2,913467	0,288444	0,099102
9	112,10	169,93	169,82	2,936538	2,938440	0,190213	0,064774
10	111,51	169,30	169,17	2,927323	2,929573	0,224952	0,076846

Índices Físicos após ensaios de 30 dias São Marcos							
Amostras	Peso Submerso (C)	Peso Saturado (B)	Peso Seco (A)	Massa Específica Aparente Seca	Massa Específica Aparente Saturada	Porosidade Aparente	Absorção da Água Aparente
1	110,70	168,59	168,40	2,908965	2,912247	0,328209	0,112827
2	111,89	170,38	170,20	2,909899	2,912977	0,307745	0,105758
3	111,28	169,28	169,05	2,914655	2,918621	0,396552	0,136054
4	110,46	167,98	167,78	2,916898	2,920376	0,347705	0,119204
5	110,07	167,41	167,18	2,915591	2,919602	0,401116	0,137576
6	113,19	171,82	171,60	2,926829	2,930582	0,375235	0,128205
7	110,82	168,59	168,40	2,915008	2,918297	0,328890	0,112827
8	106,04	161,53	161,38	2,908272	2,910975	0,270319	0,092948
9	112,00	169,92	169,67	2,929385	2,933702	0,431630	0,147345
10	111,40	169,24	168,99	2,921680	2,926003	0,432227	0,147938

Índices Físicos após ensaios de 60 dias São Marcos							
Amostras	Peso Submerso (C)	Peso Saturado (B)	Peso Seco (A)	Massa Específica Aparente Seca	Massa Específica Aparente Saturada	Porosidade Aparente	Absorção da Água Aparente
1	110,66	168,50	168,25	2,908887	2,913209	0,432227	0,148588
2	111,86	170,31	170,08	2,909837	2,913772	0,393499	0,135230
3	111,25	169,25	168,98	2,913448	2,918103	0,465517	0,159782
4	110,43	167,95	167,70	2,915508	2,919854	0,434631	0,149076
5	110,06	167,36	167,12	2,916579	2,920768	0,418848	0,143609
6	113,15	171,78	171,54	2,925806	2,929899	0,409347	0,139909
7	110,80	168,53	168,28	2,914949	2,919279	0,433050	0,148562
8	106,03	161,49	161,27	2,907862	2,911828	0,396682	0,136417
9	111,99	169,89	169,64	2,929879	2,934197	0,431779	0,147371
10	111,97	169,21	168,96	2,951782	2,956150	0,436758	0,147964

Índices Físicos antes dos ensaios Aracruz							
Amostras	Peso Submerso (C)	Peso Saturado (B)	Peso Seco (A)	Massa Específica Aparente Seca	Massa Específica Aparente Saturada	Porosidade Aparente	Absorção da Água Aparente
1	114,28	168,37	168,10	3,107783	3,112775	0,499168	0,160619
2	110,68	163,51	163,24	3,089911	3,095022	0,511073	0,165401
3	109,06	160,92	160,63	3,097378	3,102970	0,559198	0,180539
4	112,52	166,15	165,86	3,092672	3,098079	0,540742	0,174846
5	112,48	165,57	165,31	3,113769	3,118666	0,489734	0,157280
6	112,35	165,93	165,65	3,091639	3,096865	0,522583	0,169031
7	111,14	163,97	163,71	3,098807	3,103729	0,492145	0,158817
8	114,55	168,54	168,27	3,116688	3,121689	0,500093	0,160456
9	111,93	164,59	164,35	3,120965	3,125522	0,455754	0,146030
10	112,52	166,02	165,74	3,097944	3,103178	0,523364	0,168939

Índices Físicos após ensaios de 30 dias Aracruz							
Amostras	Peso Submerso (C)	Peso Saturado (B)	Peso Seco (A)	Massa Específica Aparente Seca	Massa Específica Aparente Saturada	Porosidade Aparente	Absorção da Água Aparente
1	114,23	168,33	168,02	3,105730	3,111460	0,573013	0,184502
2	110,61	163,48	163,15	3,085871	3,092113	0,624172	0,202268
3	109,01	160,87	160,55	3,095835	3,102005	0,617046	0,199315
4	112,49	166,11	165,81	3,092316	3,097911	0,559493	0,180930
5	112,43	165,53	165,23	3,111676	3,117326	0,564972	0,181565
6	112,28	165,89	165,57	3,088416	3,094385	0,596904	0,193272
7	111,09	163,94	163,65	3,096500	3,101987	0,548723	0,177207
8	114,49	168,50	168,20	3,114238	3,119793	0,555453	0,178359
9	111,80	164,47	164,17	3,116955	3,122650	0,569584	0,182737
10	112,36	165,84	165,53	3,095176	3,100972	0,579656	0,187277

Índices Físicos após ensaios de 60 dias Aracruz							
Amostras	Peso Submerso (C)	Peso Saturado (B)	Peso Seco (A)	Massa Específica Aparente Seca	Massa Específica Aparente Saturada	Porosidade Aparente	Absorção da Água Aparente
1	114,20	168,31	167,99	3,104602	3,110516	0,591388	0,190488
2	110,59	163,44	163,12	3,086471	3,092526	0,605487	0,196175
3	108,99	160,85	160,52	3,095256	3,101620	0,636329	0,205582
4	112,48	166,08	165,74	3,092164	3,098507	0,634328	0,205141
5	112,42	165,50	165,20	3,112283	3,117935	0,565185	0,181598
6	112,28	165,88	165,53	3,088246	3,094776	0,652985	0,211442
7	111,08	163,92	163,61	3,096329	3,102195	0,586677	0,189475
8	114,48	168,49	168,18	3,113868	3,119607	0,573968	0,184326
9	111,75	164,37	164,00	3,116686	3,123717	0,703155	0,225610
10	112,29	165,75	165,40	3,093902	3,100449	0,654695	0,211608

Índices Físicos antes dos ensaios Ouro Negro							
Amostras	Peso Submerso (C)	Peso Saturado (B)	Peso Seco (A)	Massa Específica Aparente Seca	Massa Específica Aparente Saturada	Porosidade Aparente	Absorção da Água Aparente
1	92,42	142,12	141,96	2,856338	2,859557	0,321932	0,112708
2	93,23	143,01	142,88	2,870229	2,872840	0,261149	0,090985
3	92,86	142,70	142,54	2,859952	2,863162	0,321027	0,112249
4	91,39	140,84	140,71	2,845501	2,848129	0,262892	0,092389
5	92,27	141,81	141,65	2,859306	2,862535	0,322971	0,112954
6	93,00	142,61	142,44	2,871195	2,874622	0,342673	0,119348
7	91,78	141,13	140,98	2,856738	2,859777	0,303951	0,106398
8	91,14	143,01	142,87	2,754386	2,757085	0,269906	0,097991
9	92,11	141,64	141,48	2,856451	2,859681	0,323037	0,113090
10	92,27	141,87	141,72	2,857258	2,860282	0,302419	0,105843

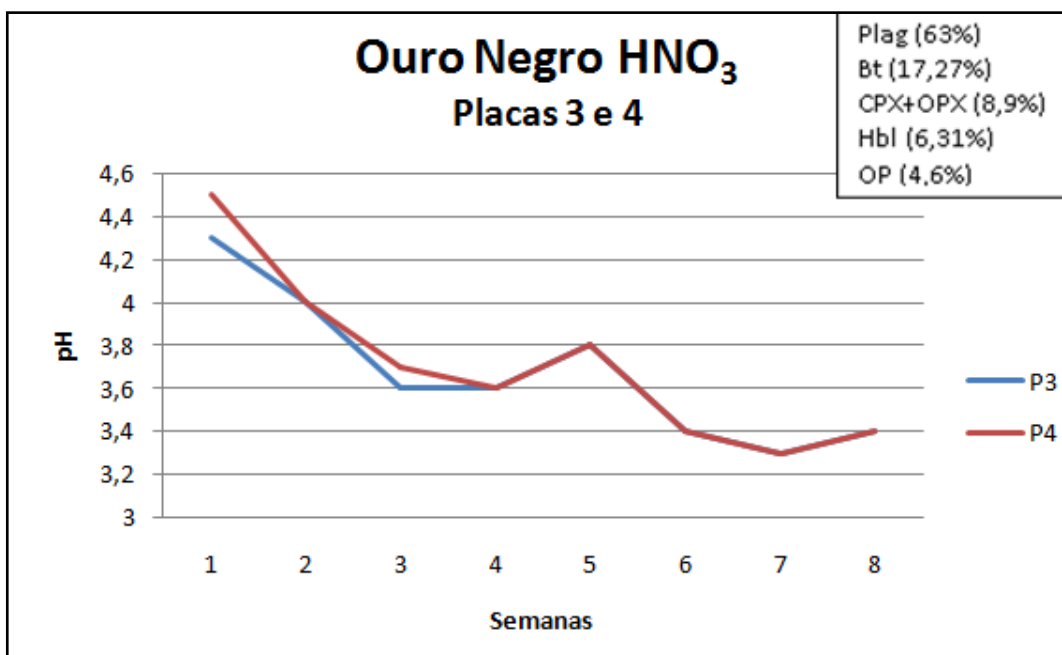
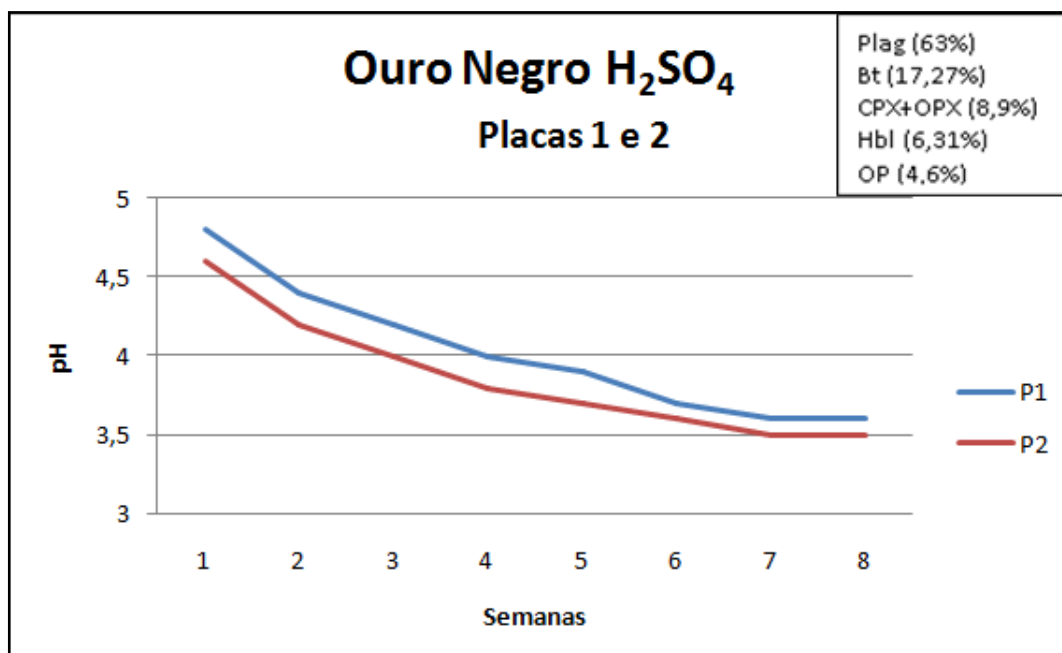
Índices Físicos após ensaios de 30 dias Ouro Negro							
Amostras	Peso Submerso (C)	Peso Saturado (B)	Peso Seco (A)	Massa Específica Aparente Seca	Massa Específica Aparente Saturada	Porosidade Aparente	Absorção da Água Aparente
1	92,37	142,10	141,73	2,849990	2,857430	0,744018	0,261060
2	93,17	142,96	142,68	2,865636	2,871259	0,562362	0,196243
3	92,80	142,65	142,32	2,854965	2,861585	0,661986	0,231872
4	91,34	140,83	140,50	2,838957	2,845625	0,666801	0,234875
5	92,21	141,77	141,41	2,853309	2,860573	0,726392	0,254579
6	92,93	142,56	142,24	2,866008	2,872456	0,644771	0,224972
7	91,72	141,11	140,75	2,849767	2,857056	0,728892	0,255773
8	93,09	142,99	142,69	2,859519	2,865531	0,601202	0,210246
9	92,10	141,64	141,32	2,852644	2,859104	0,645943	0,226436
10	92,25	141,89	141,55	2,851531	2,858380	0,684932	0,240198

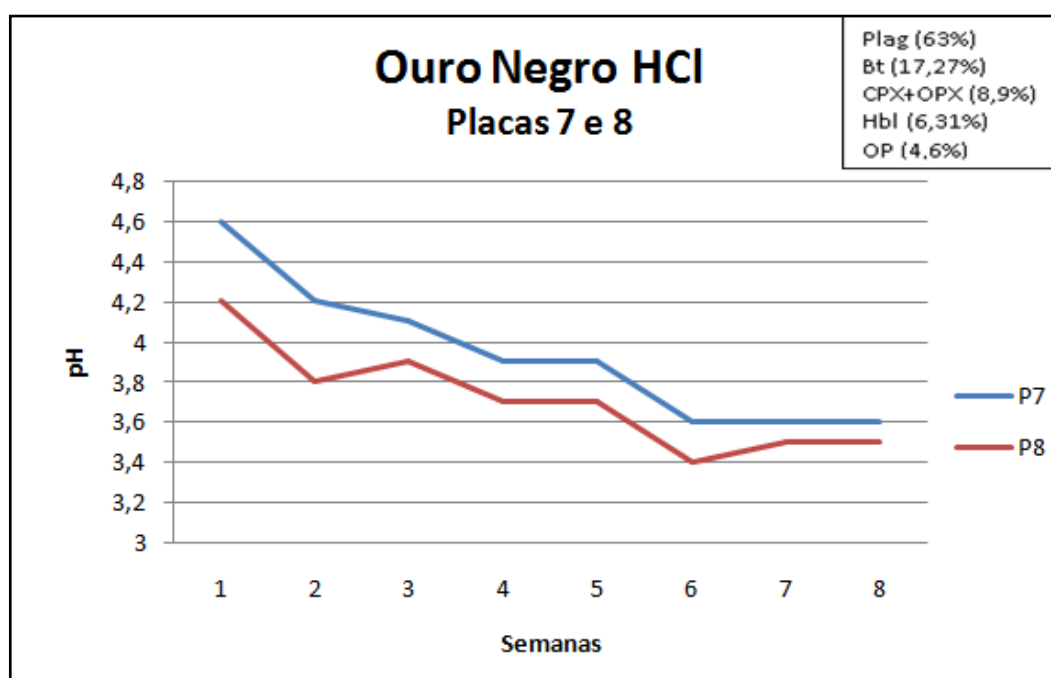
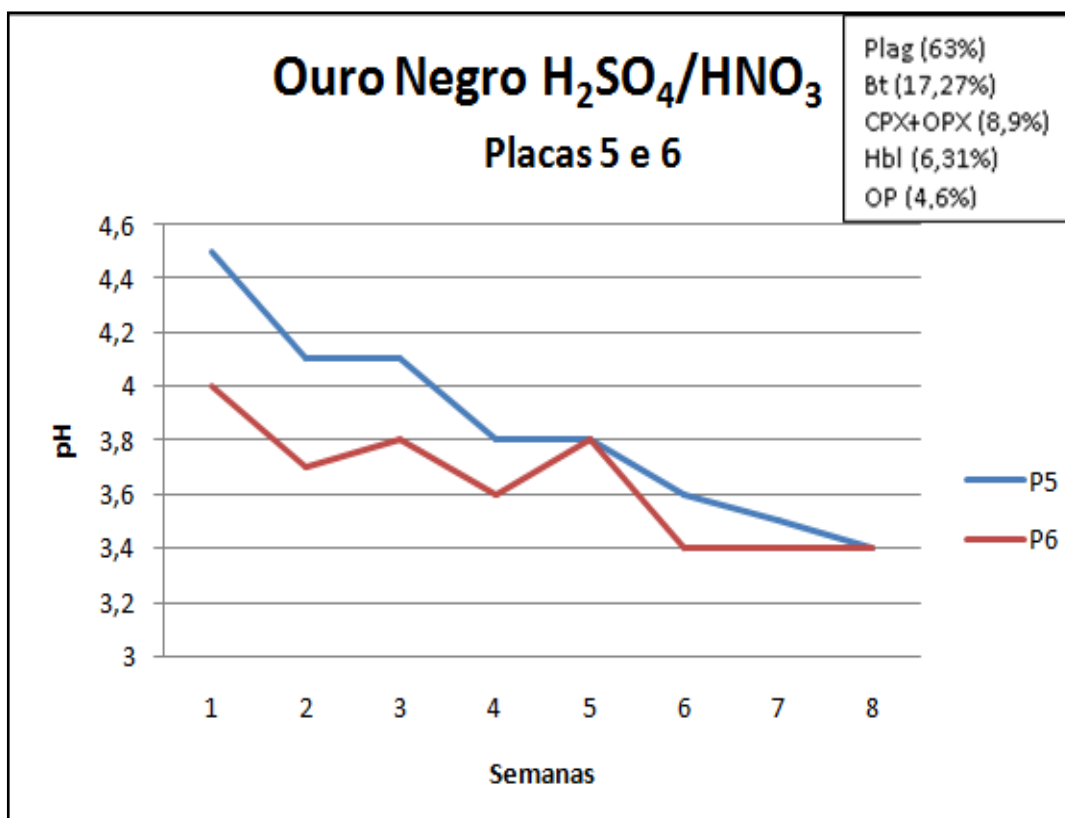
Índices Físicos após ensaios de 60 dias Ouro Negro							
Amostras	Peso Submerso (C)	Peso Saturado (B)	Peso Seco (A)	Massa Específica Aparente Seca	Massa Específica Aparente Saturada	Porosidade Aparente	Absorção da Água Aparente
1	92,34	142,04	141,63	2,849698	2,857948	0,824950	0,289487
2	93,15	142,91	142,59	2,865555	2,871986	0,643087	0,224420
3	92,75	142,49	142,24	2,859670	2,864696	0,502614	0,175759
4	91,29	140,76	140,39	2,837882	2,845361	0,747928	0,263552
5	92,16	141,72	141,32	2,851493	2,859564	0,807103	0,283046
6	92,89	142,52	142,16	2,864397	2,871650	0,725368	0,253236
7	91,68	141,06	140,67	2,848724	2,856622	0,789793	0,277245
8	93,07	142,96	142,62	2,858689	2,865504	0,681499	0,238396
9	92,08	141,89	141,50	2,840795	2,848625	0,782975	0,275618
10	92,25	141,66	141,32	2,860150	2,867031	0,688120	0,240589

ANEXO II

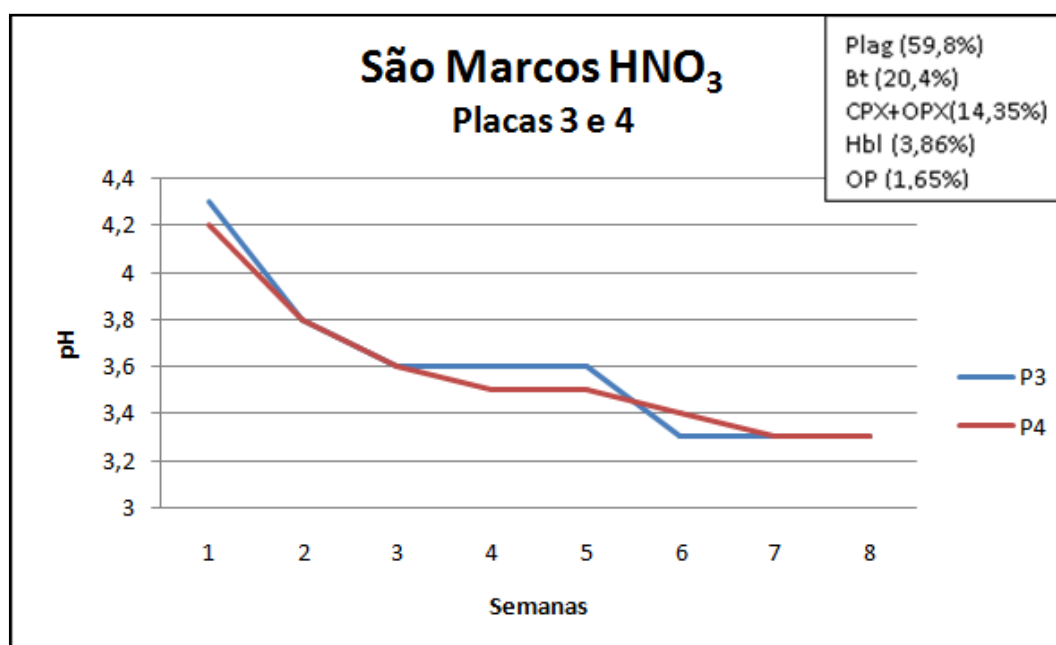
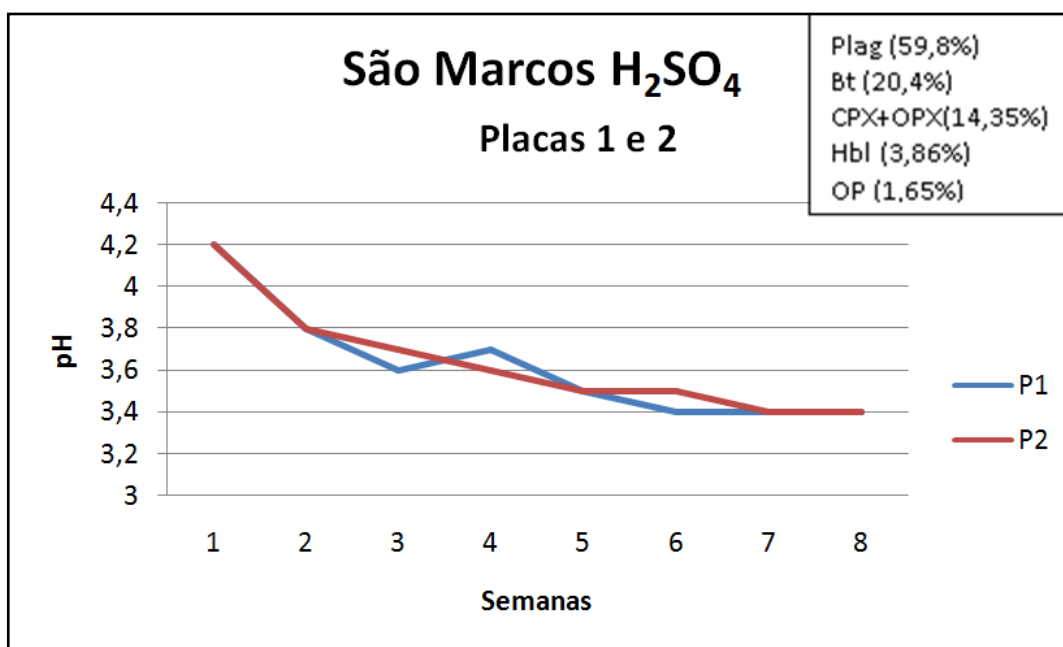
GRÁFICOS pH x SEMANAS

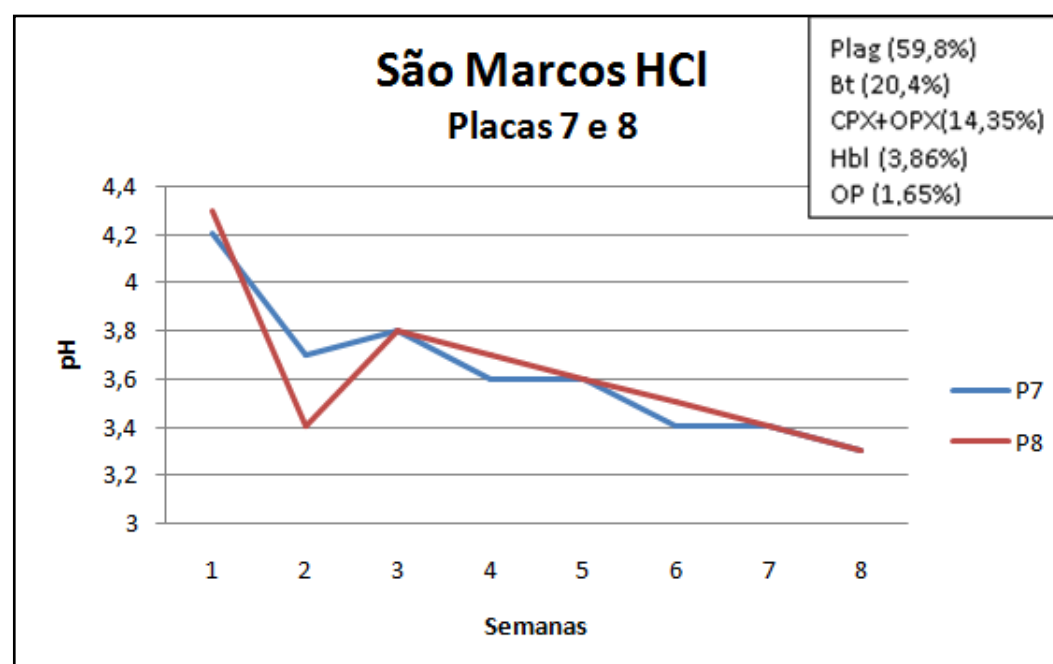
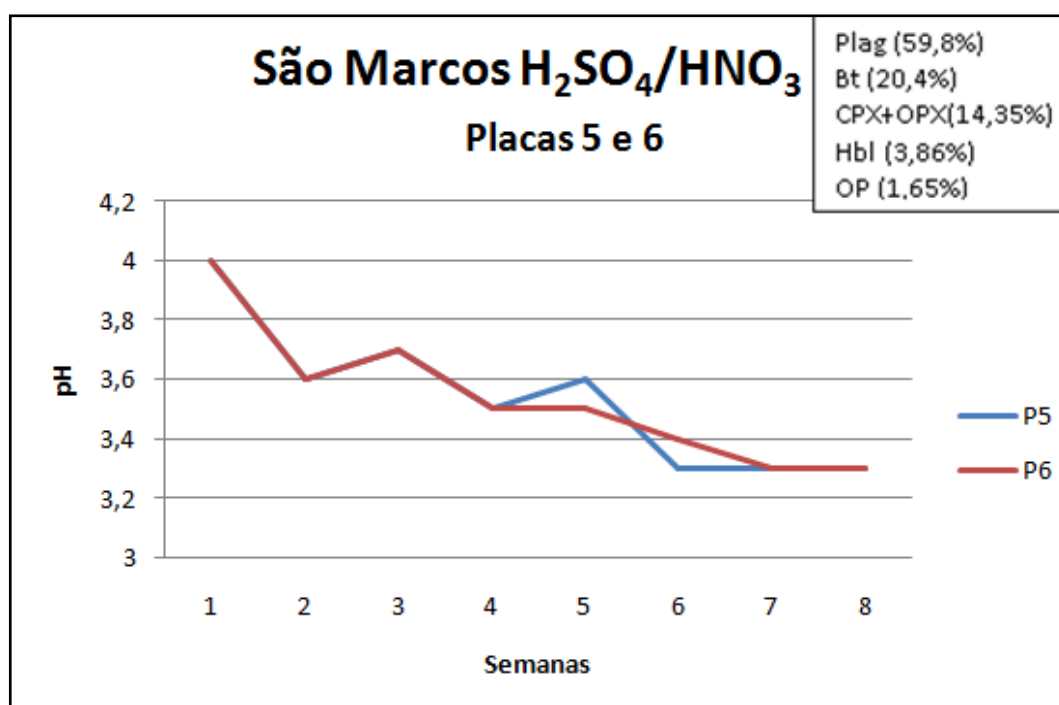
Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida (H_2SO_4) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” Ouro Negro.



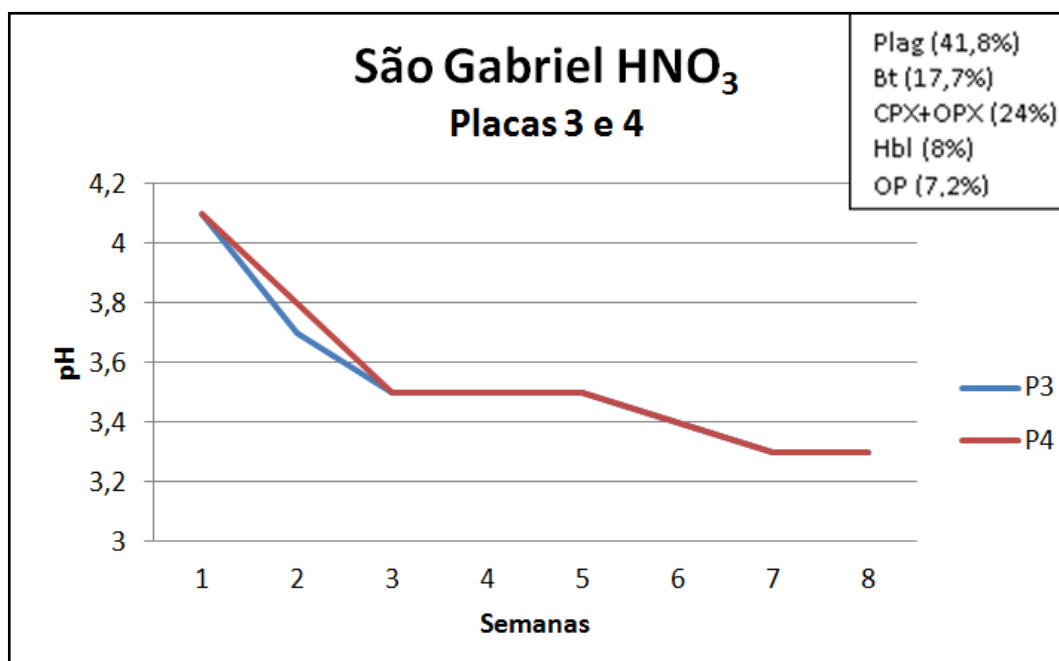
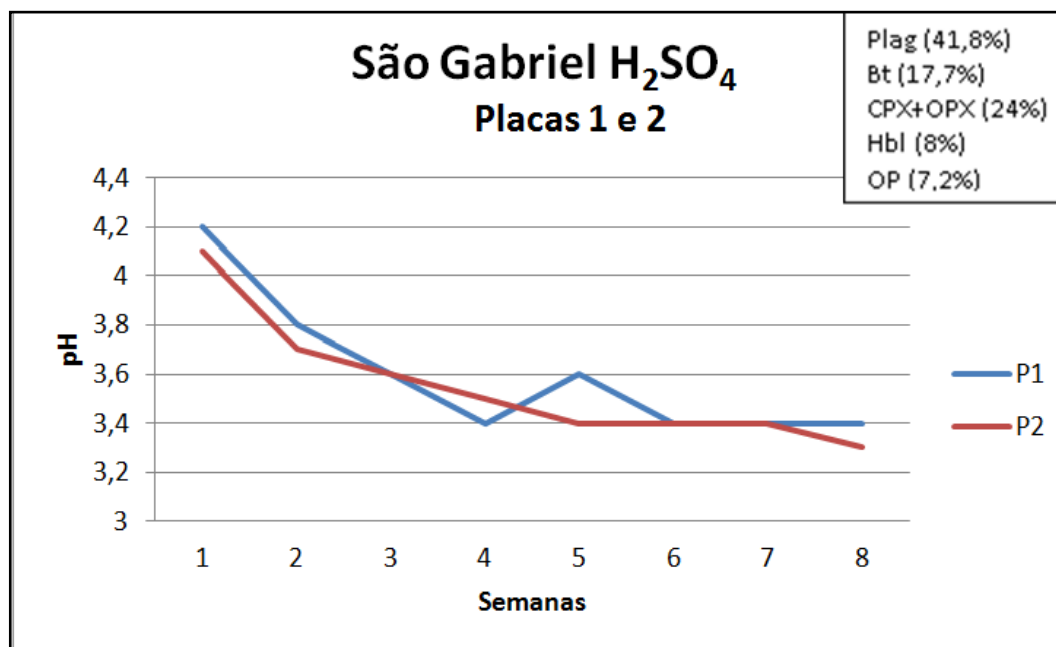


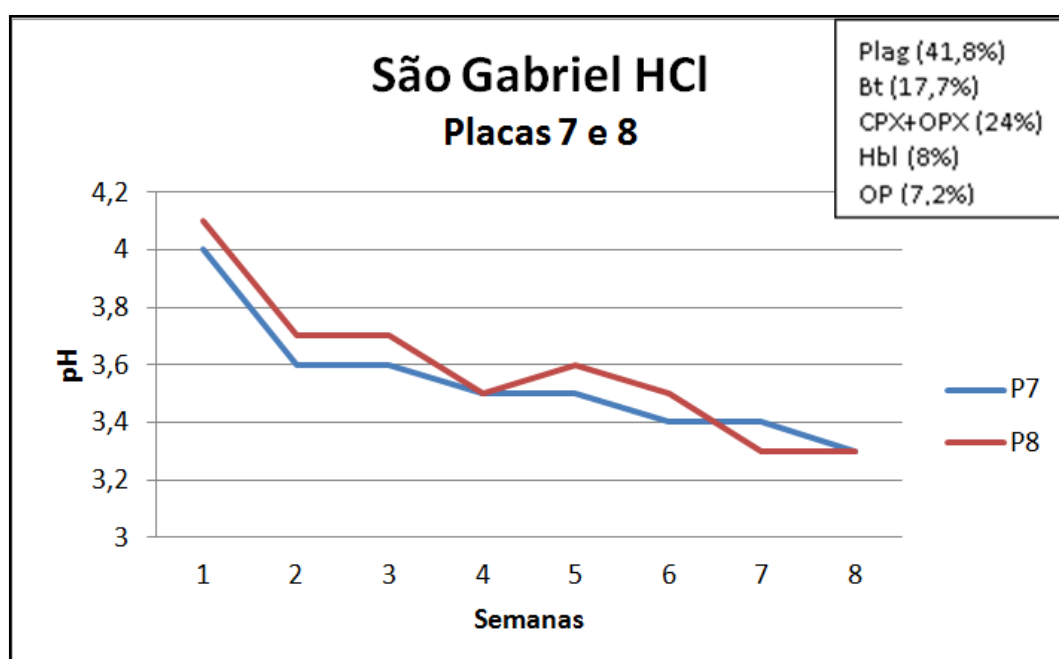
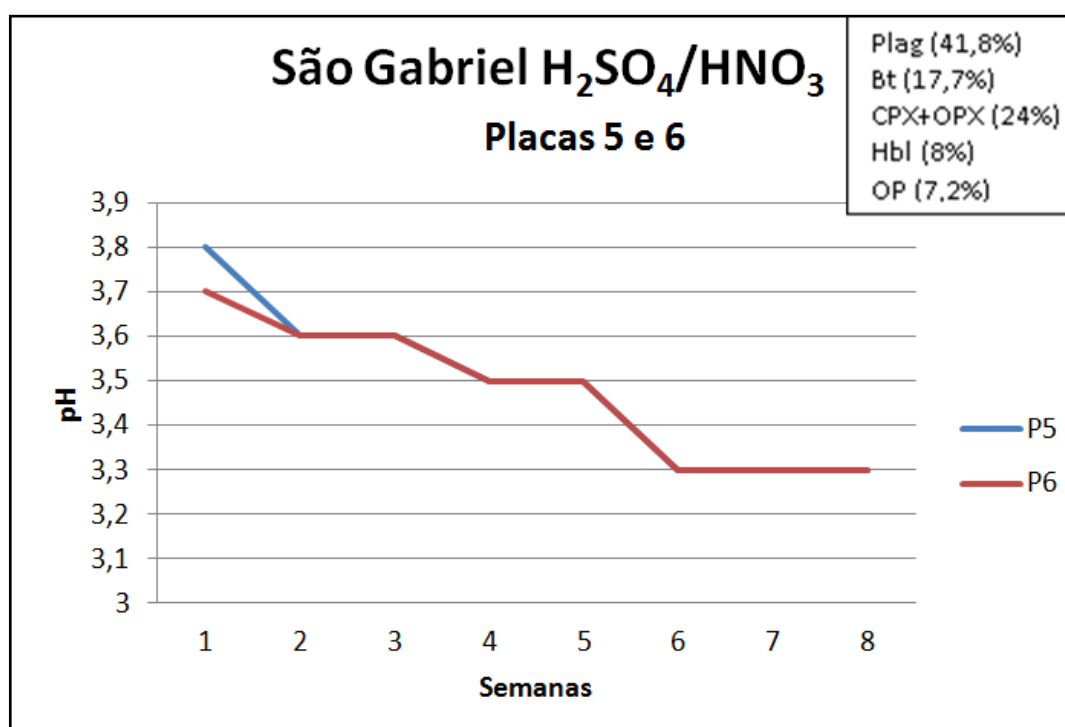
Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida (H_2SO_4) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” São Marcos.

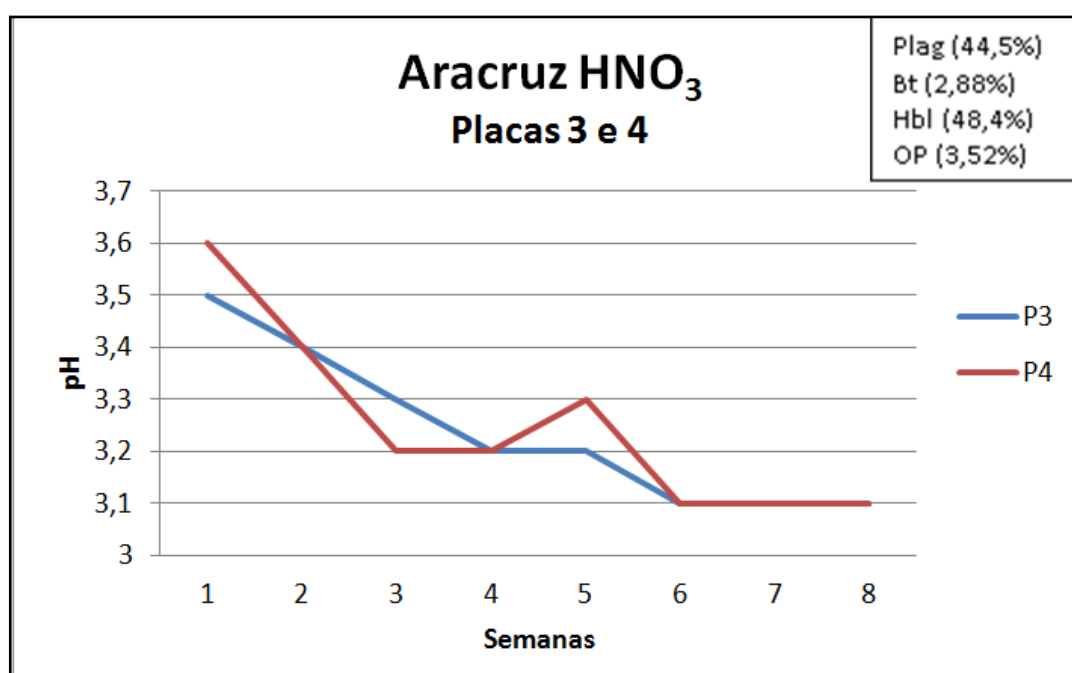
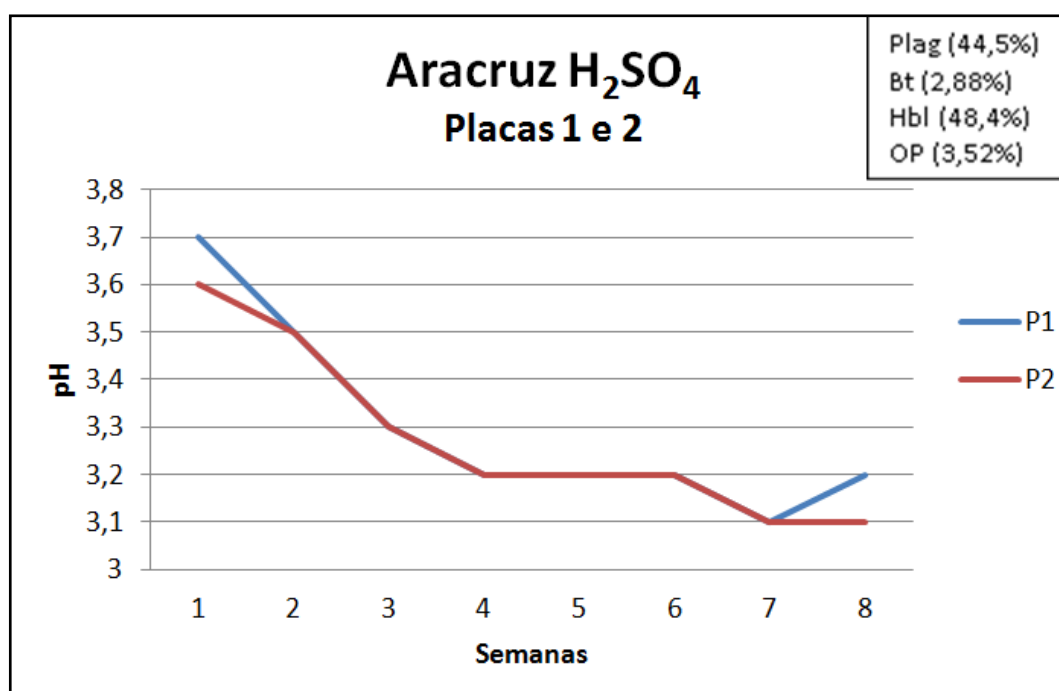


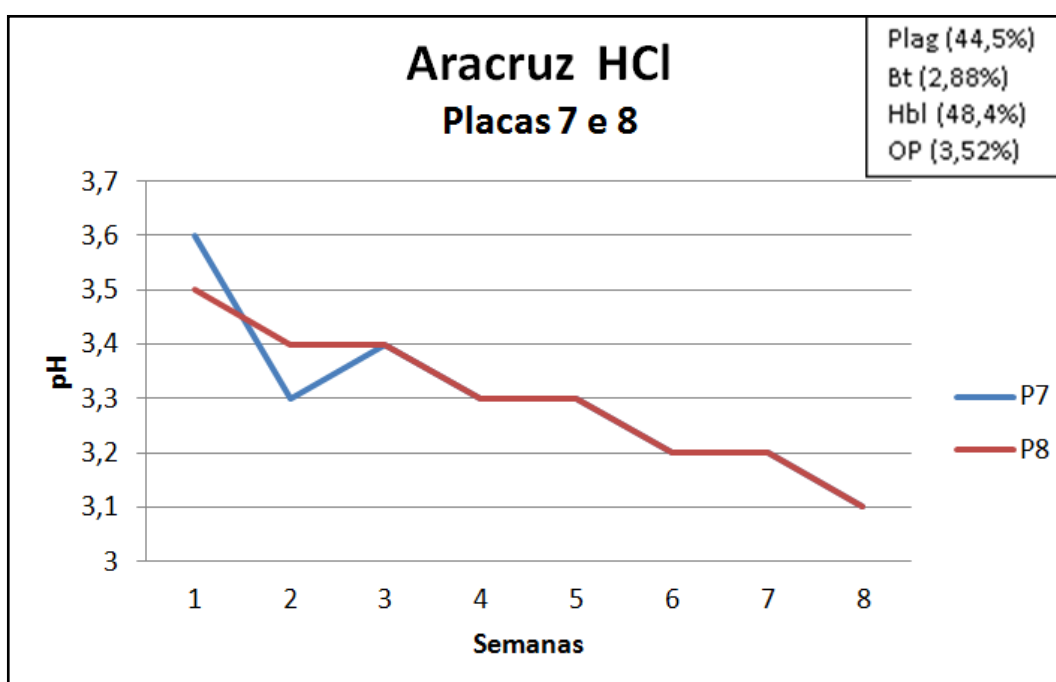
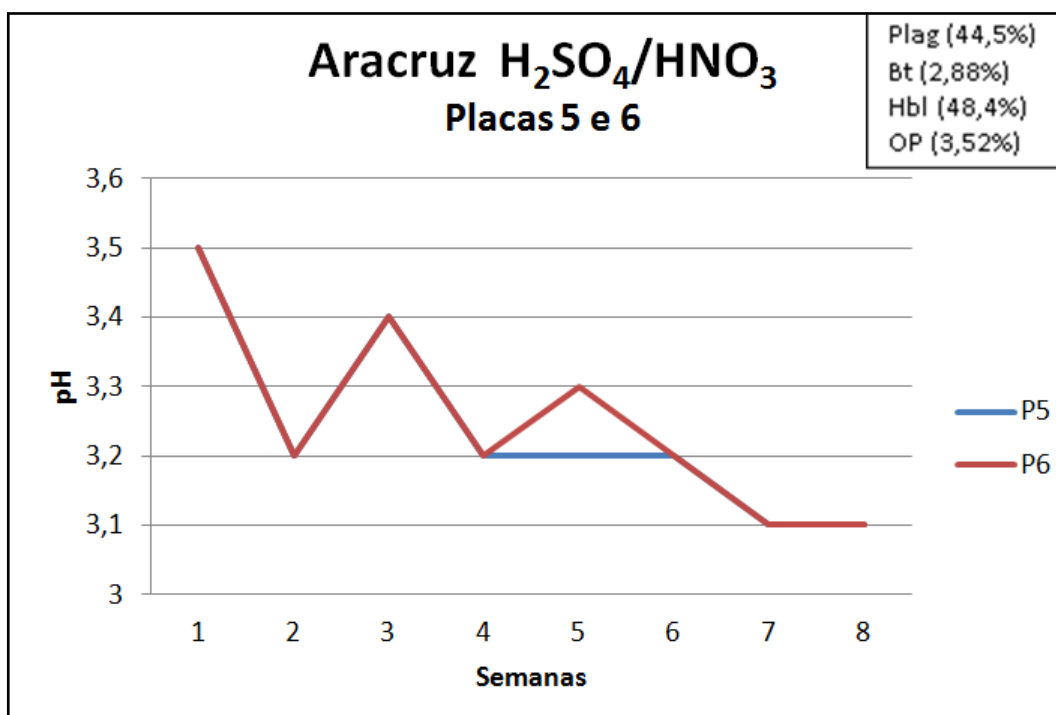


Morfologia da evolução de pH da solução residual ácida (H_2SO_4) em 8 semanas de ataque em corpos de prova do “granito” São Gabriel.



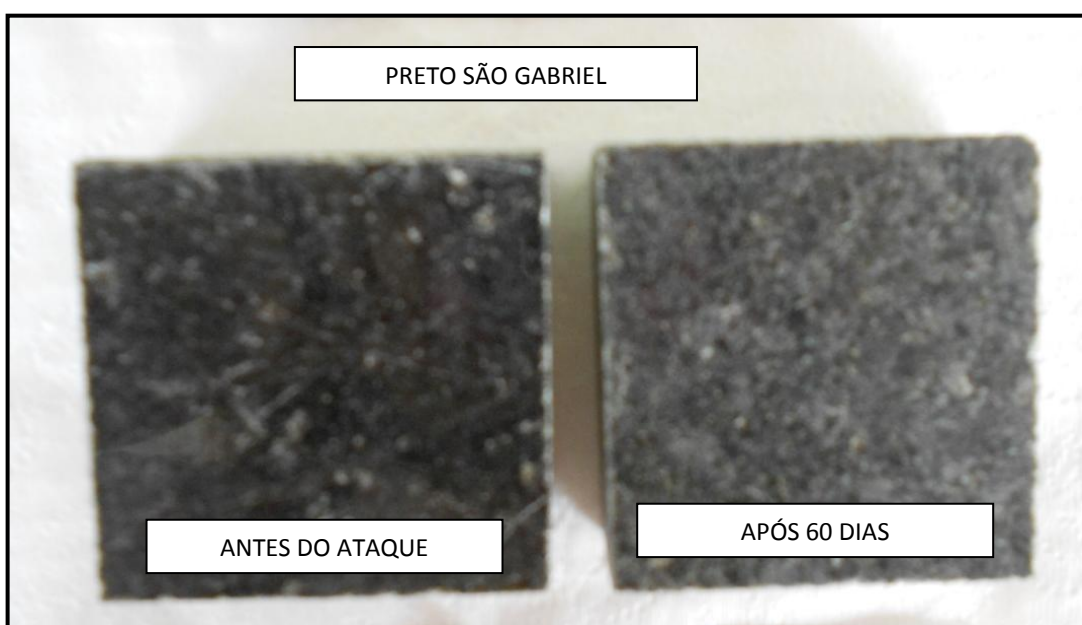
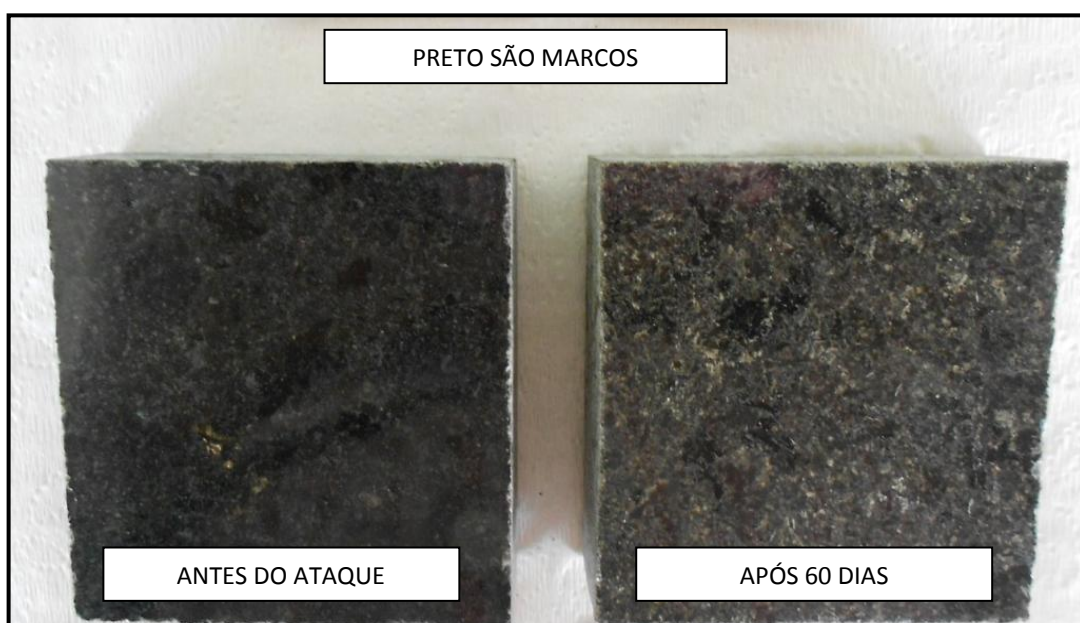


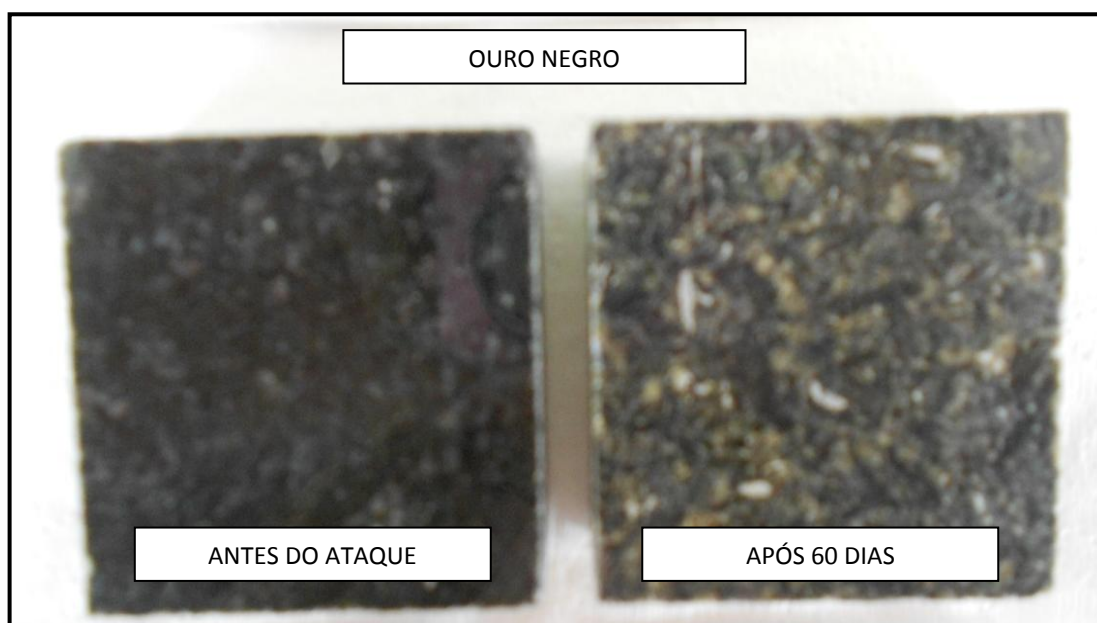




ANEXO IV

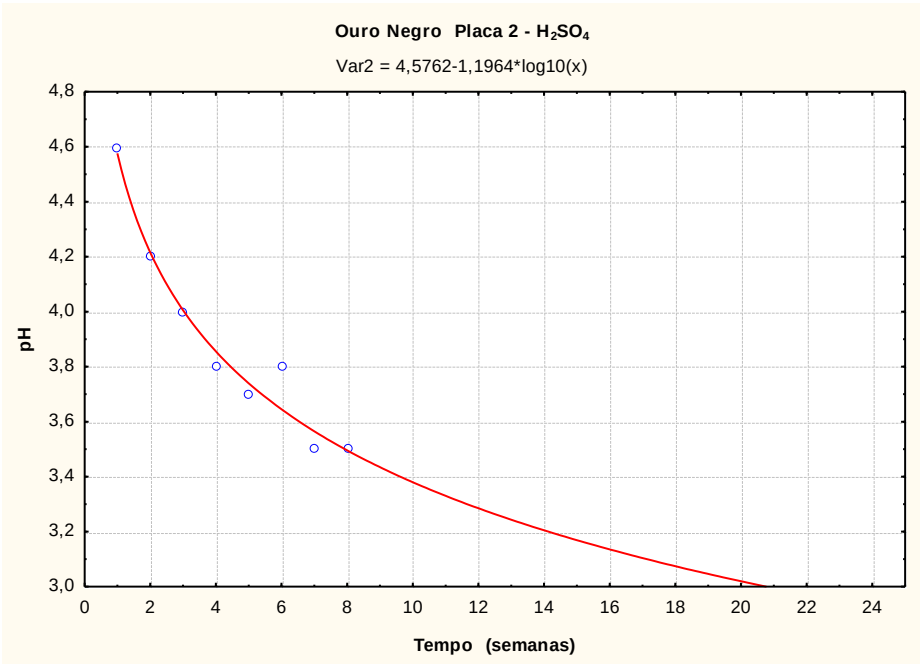
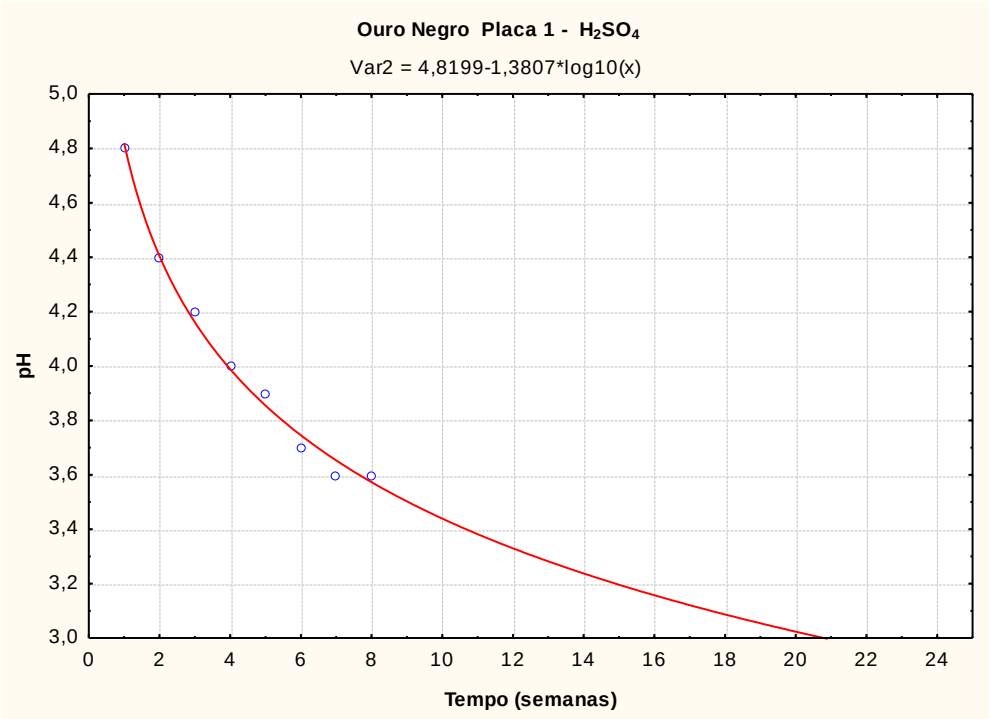
Fotos do ensaio de alterabilidade dos litotipos estudados – Placas antes e depois do ataque.

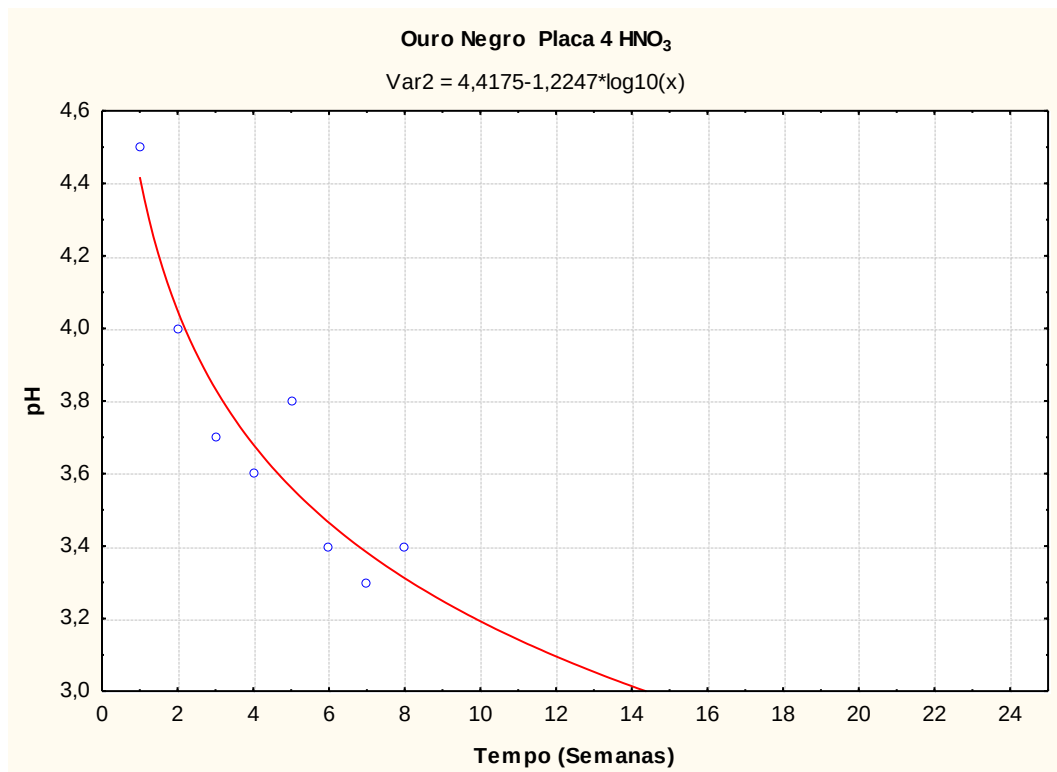
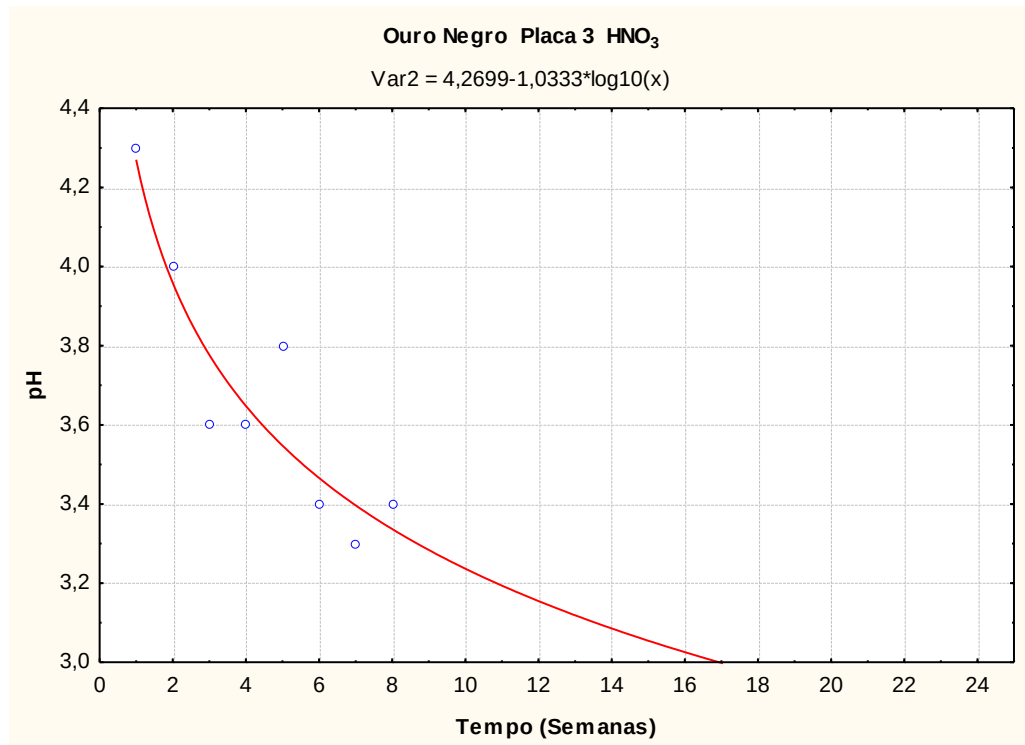


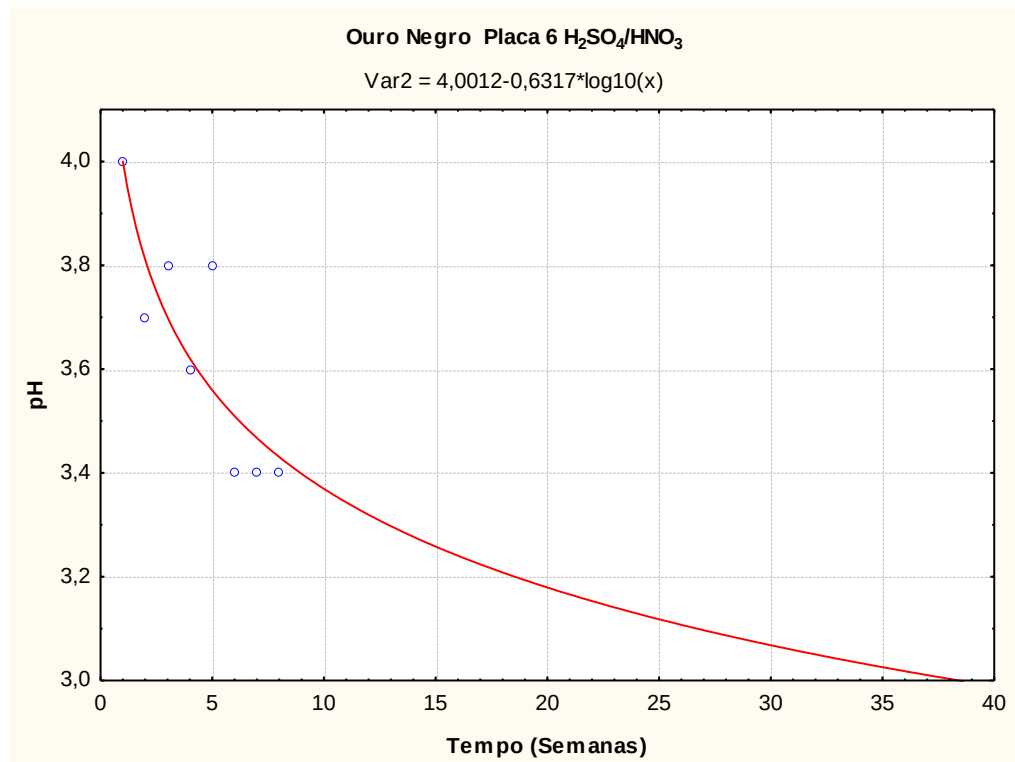
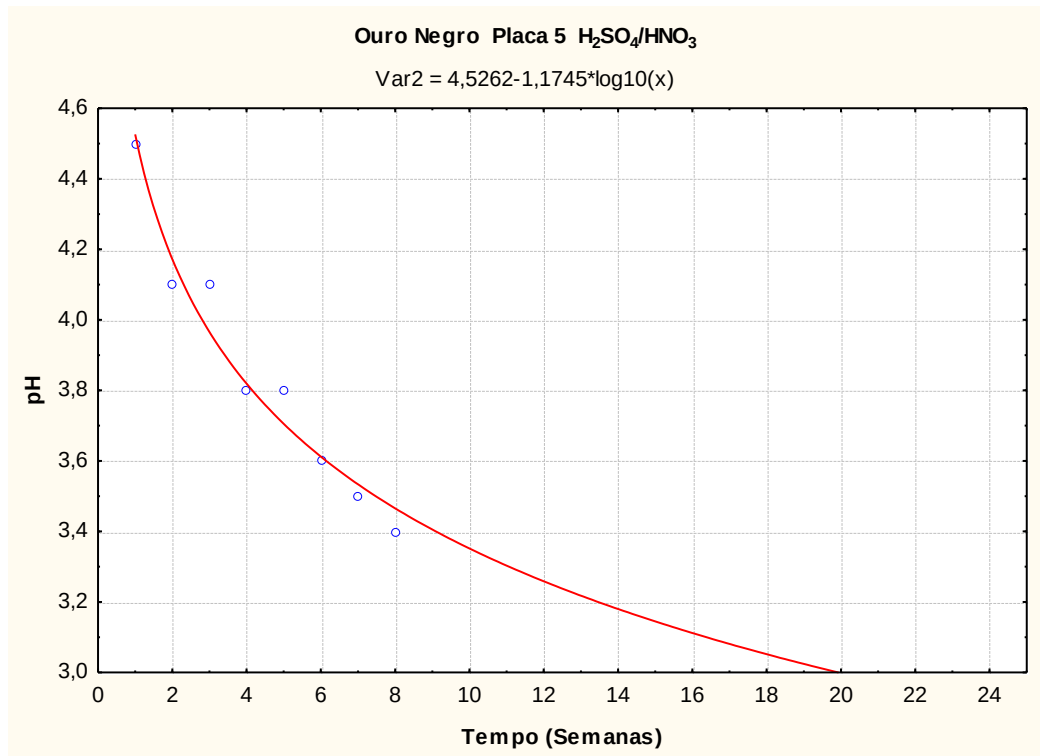


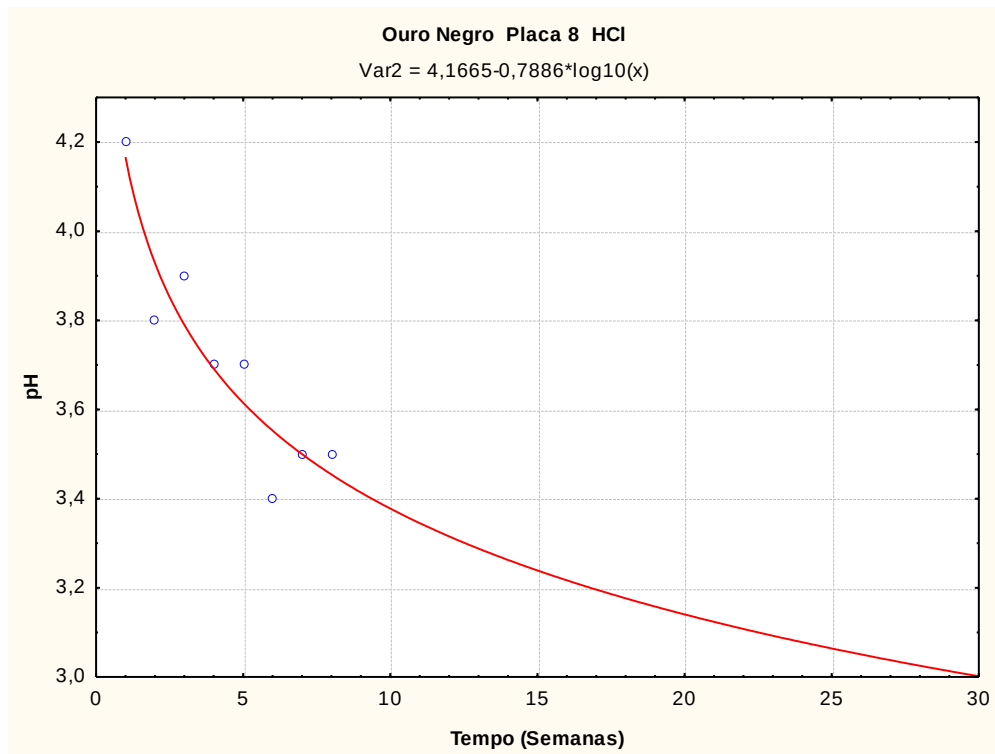
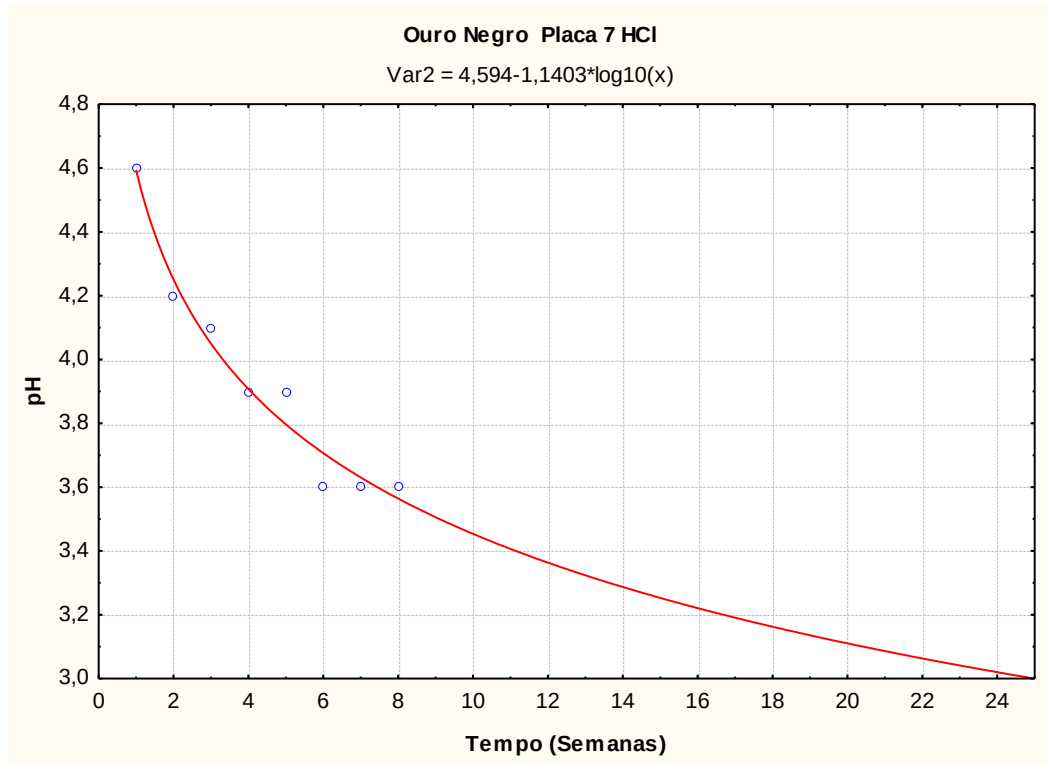
ANEXO V

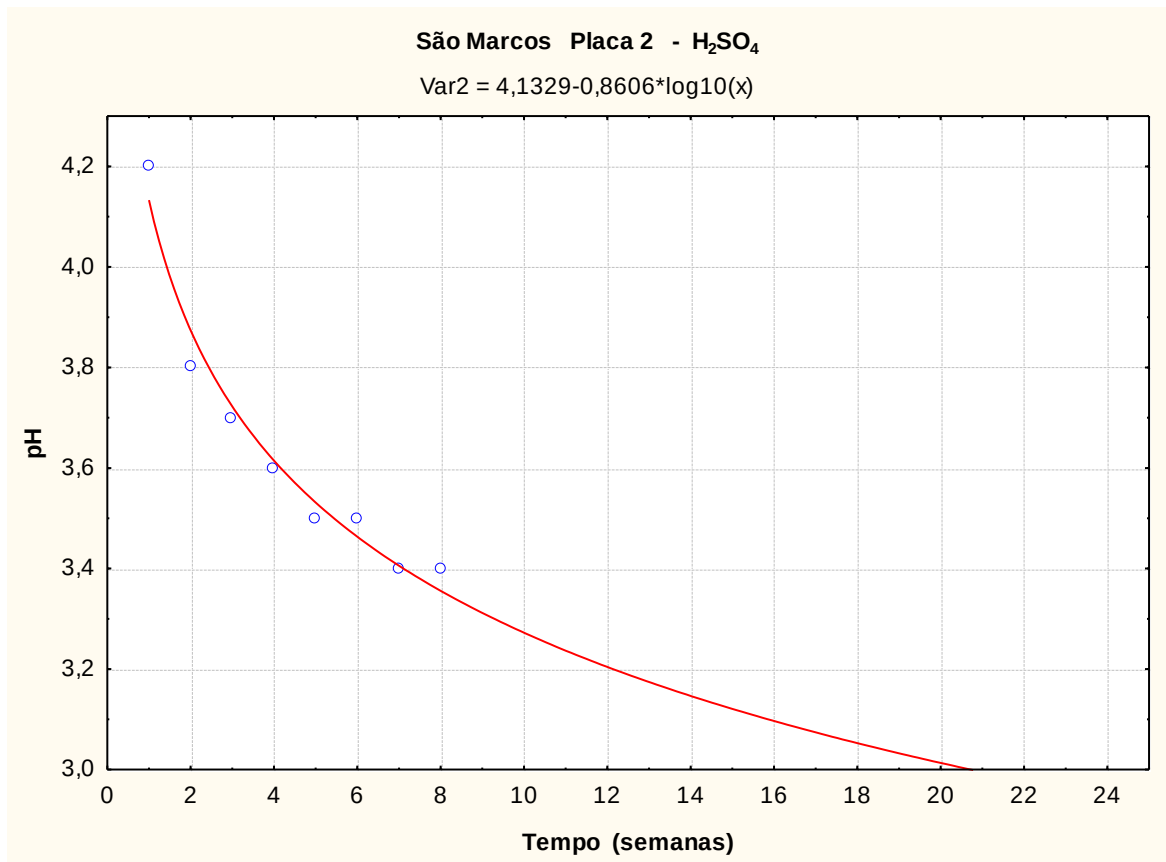
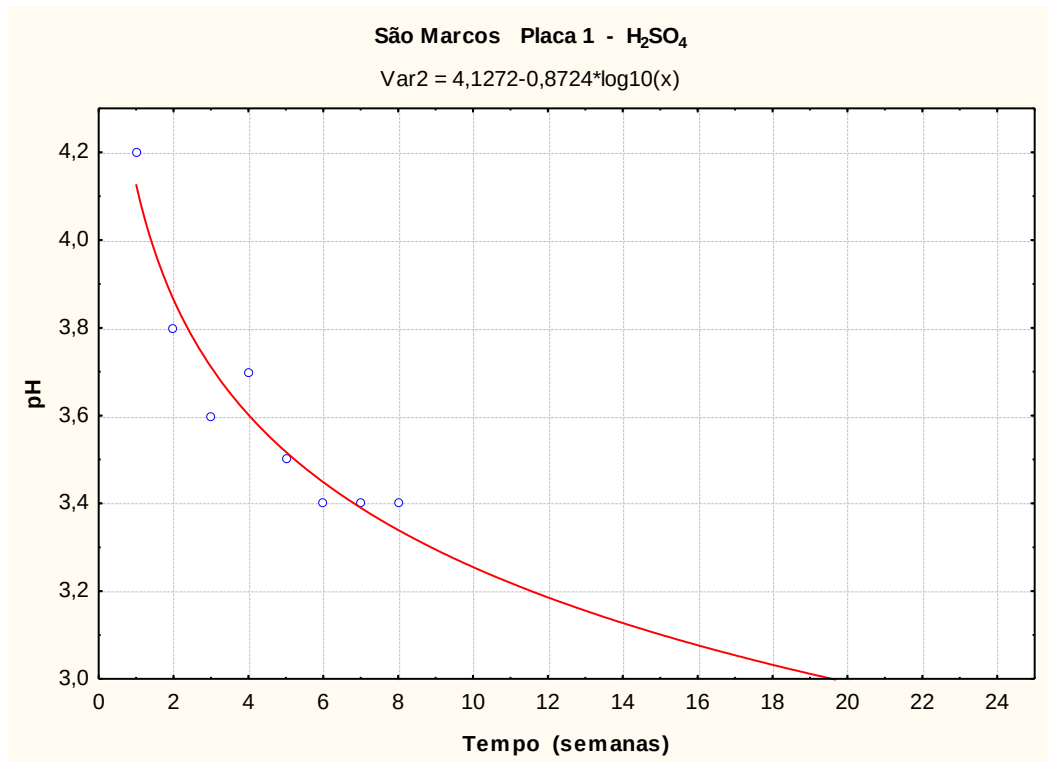
Gráficos Equação de 2º Grau Log (ph x semanas)

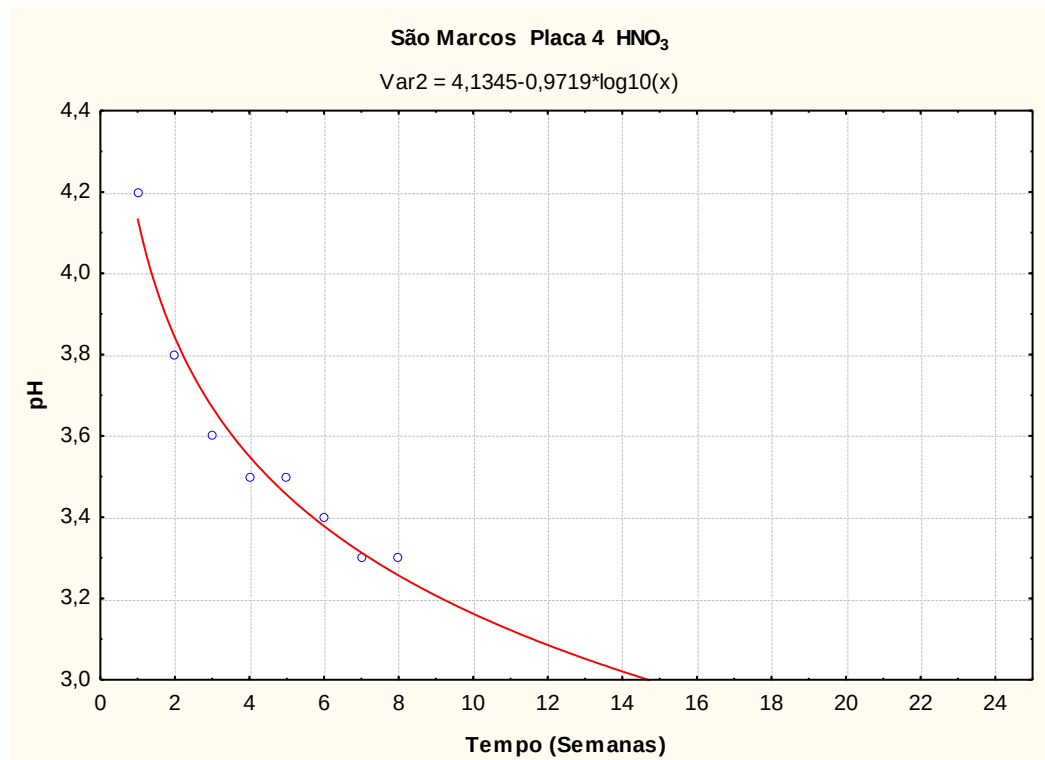
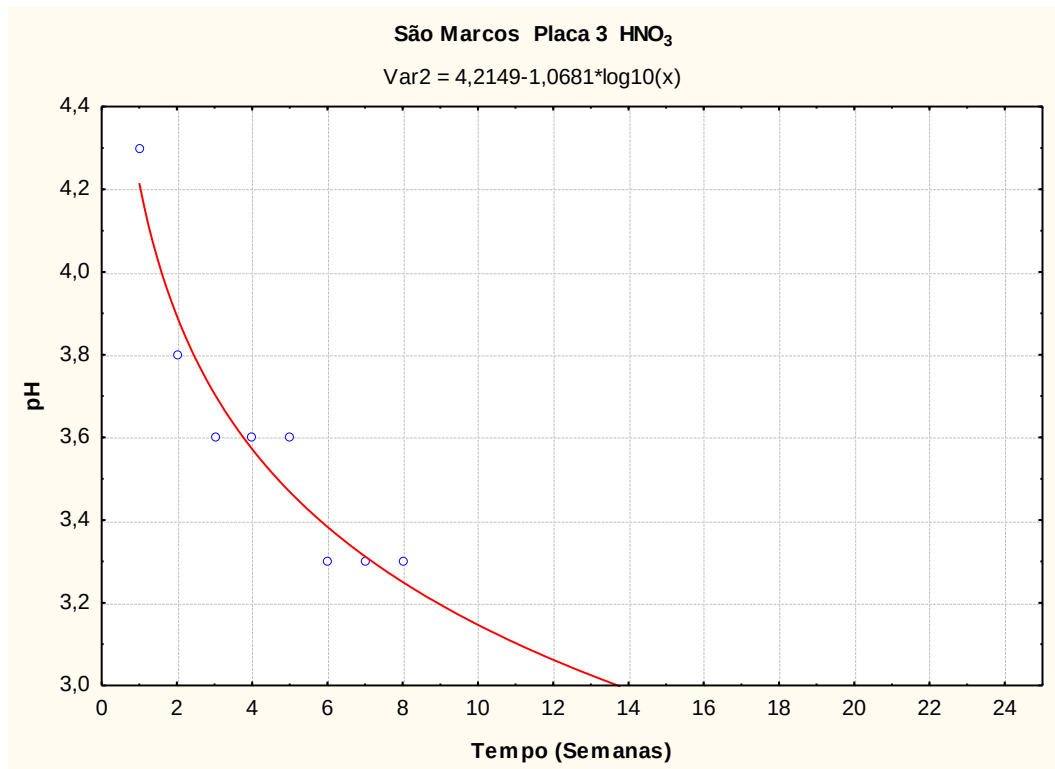


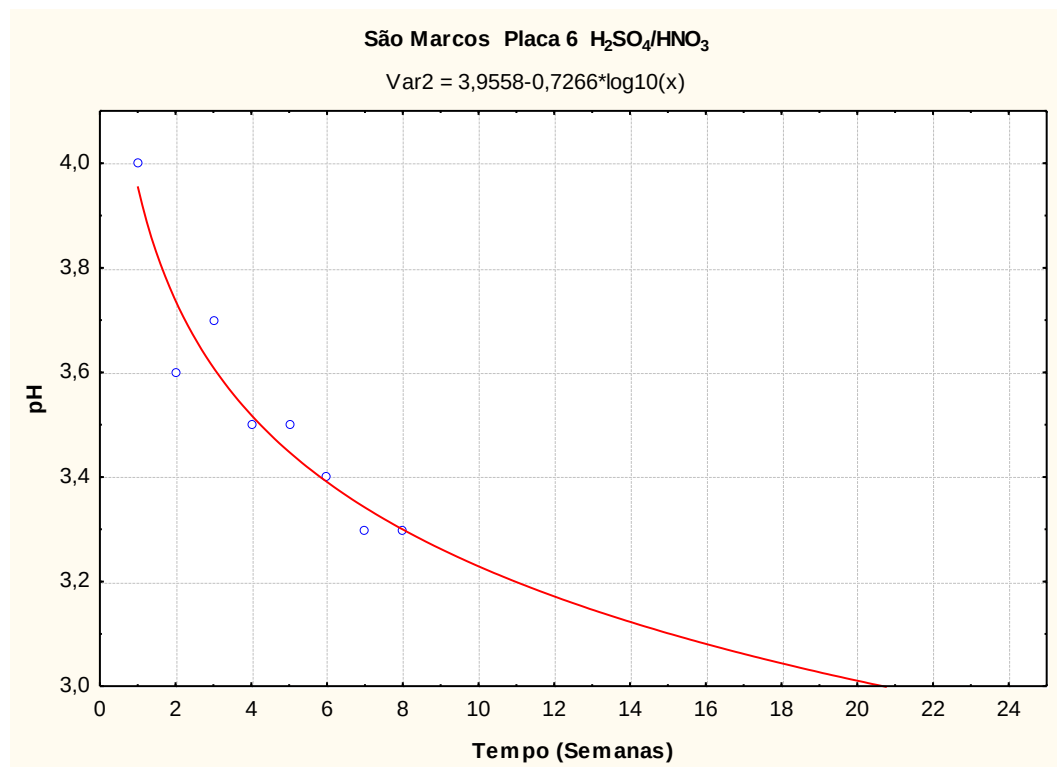
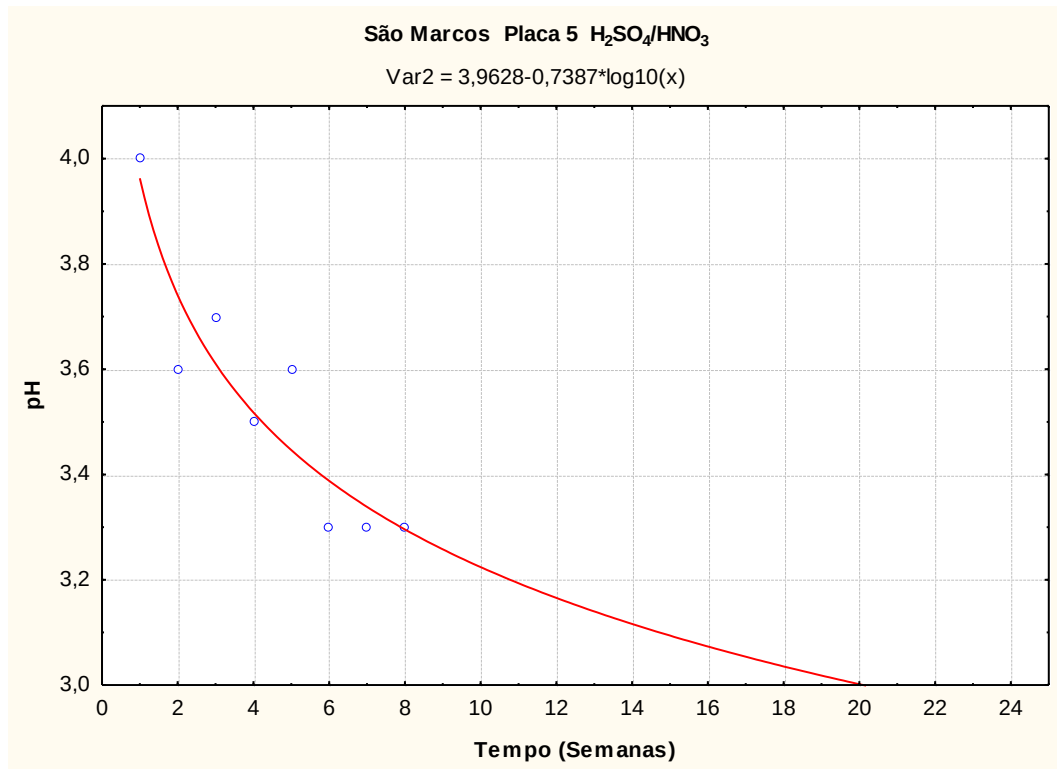


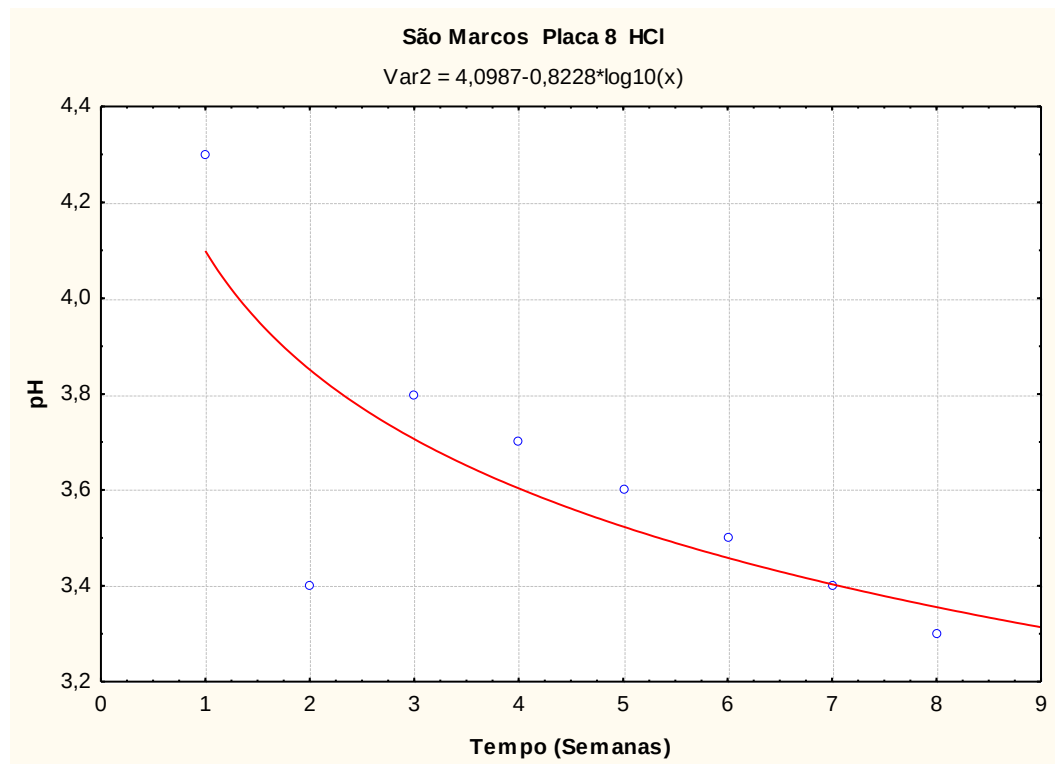
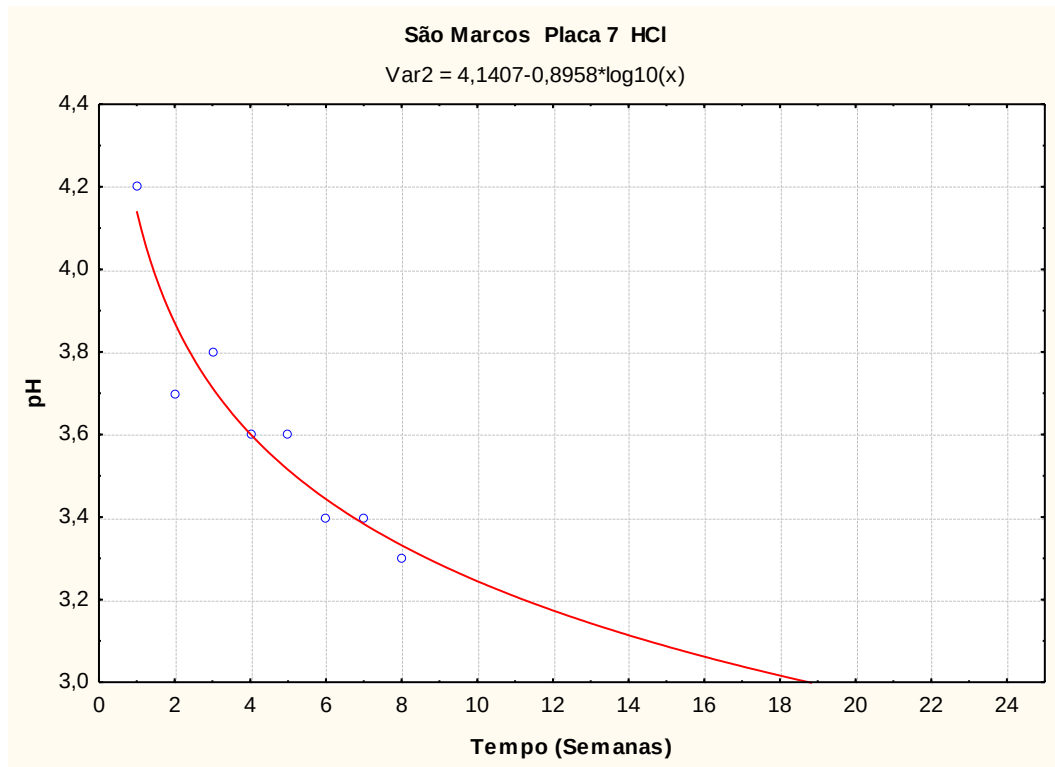


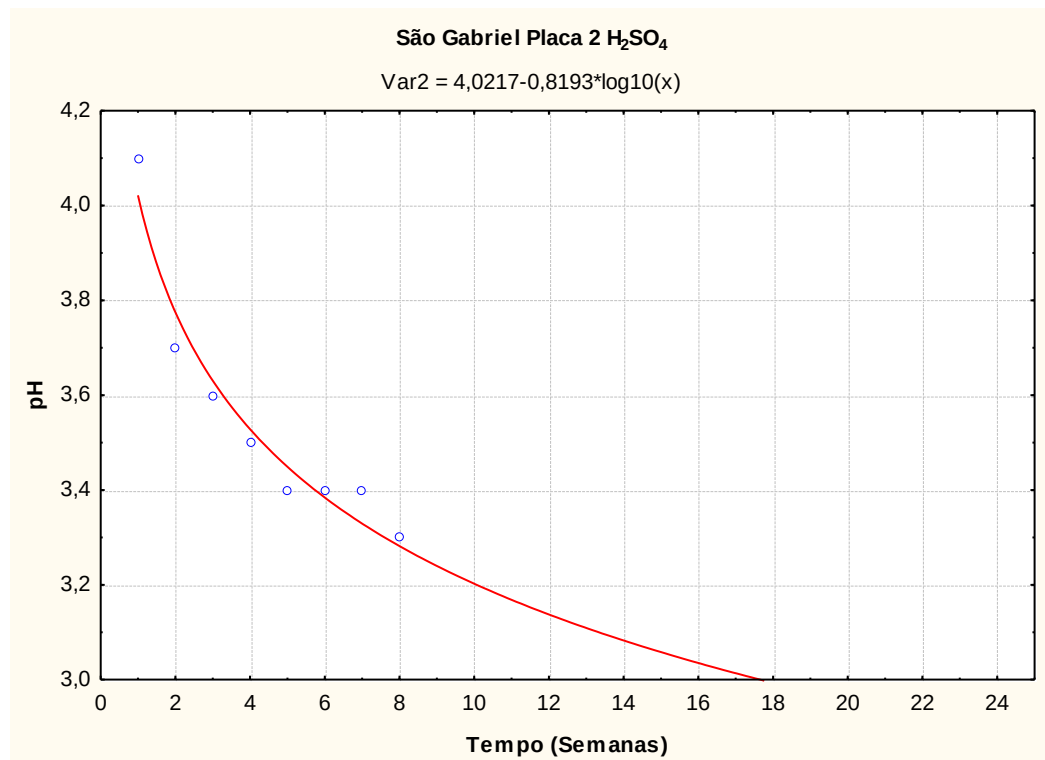
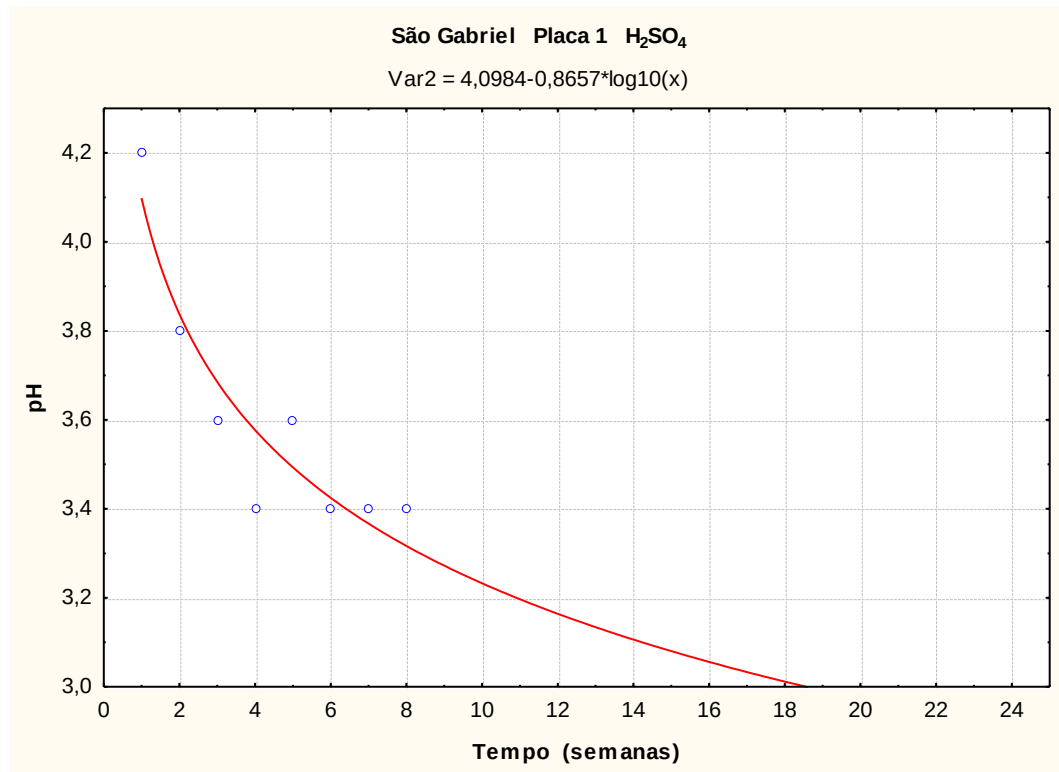


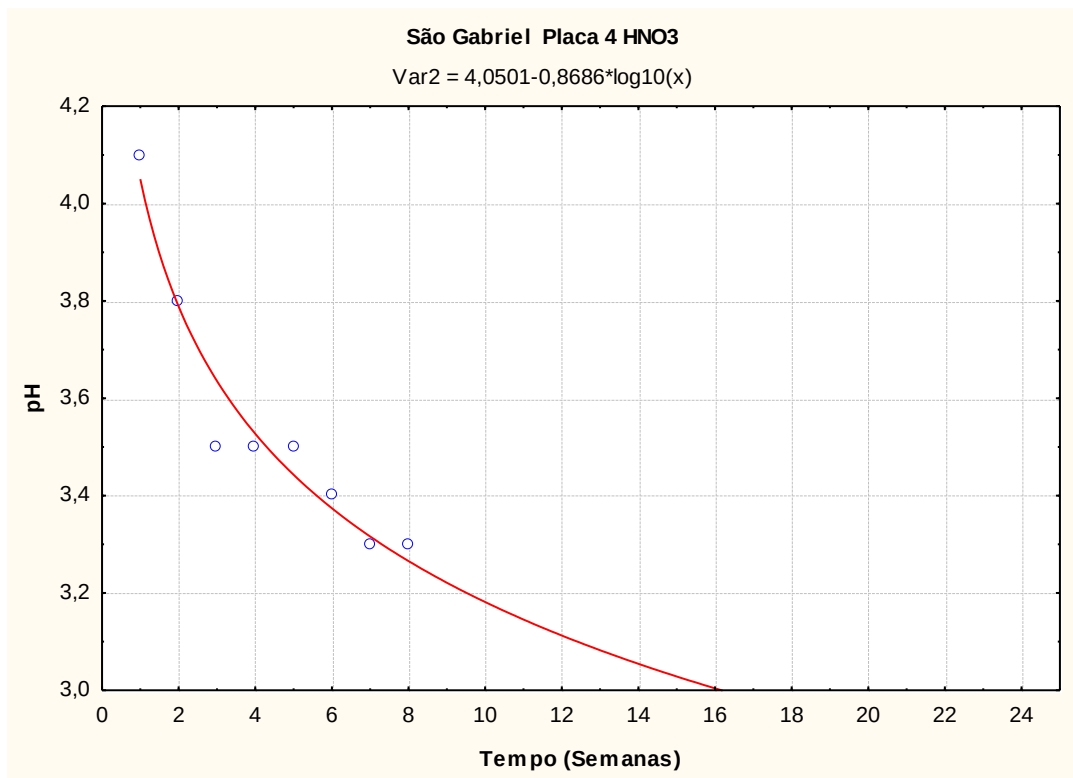
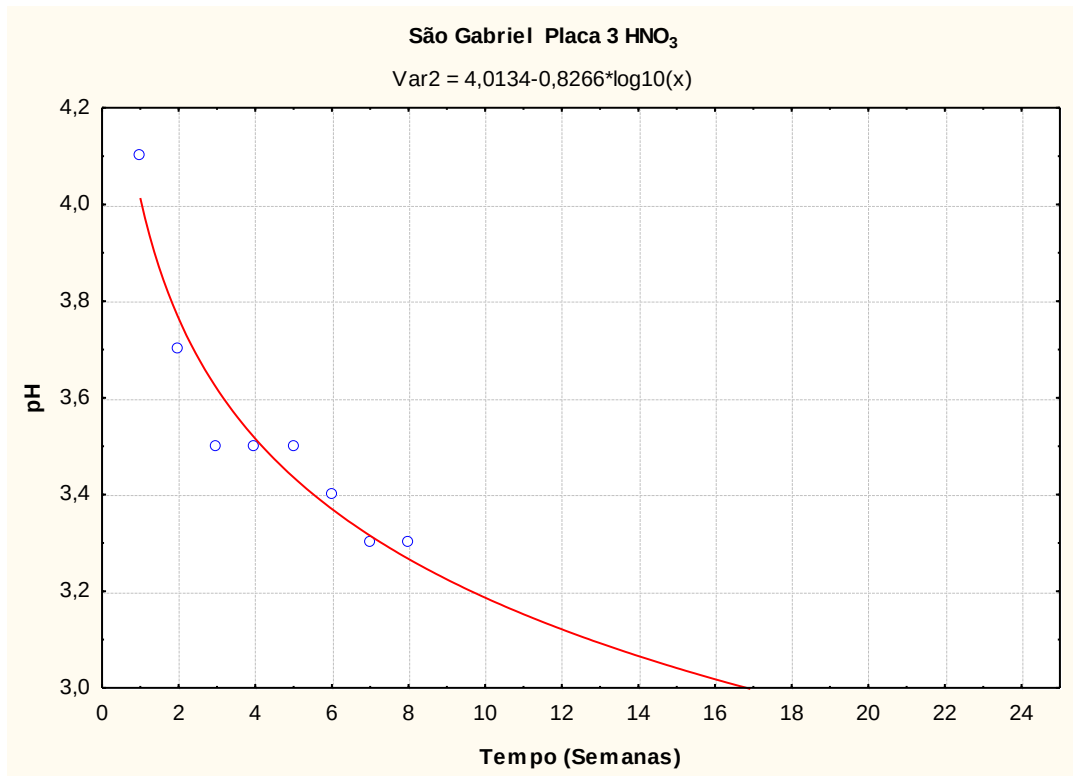


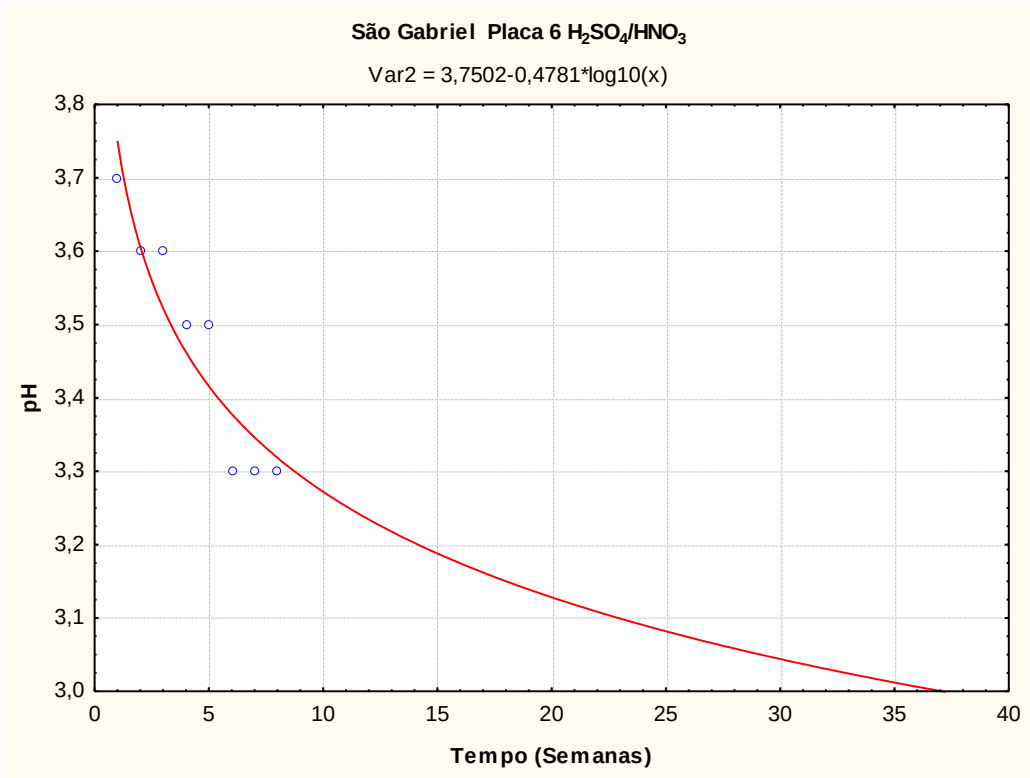
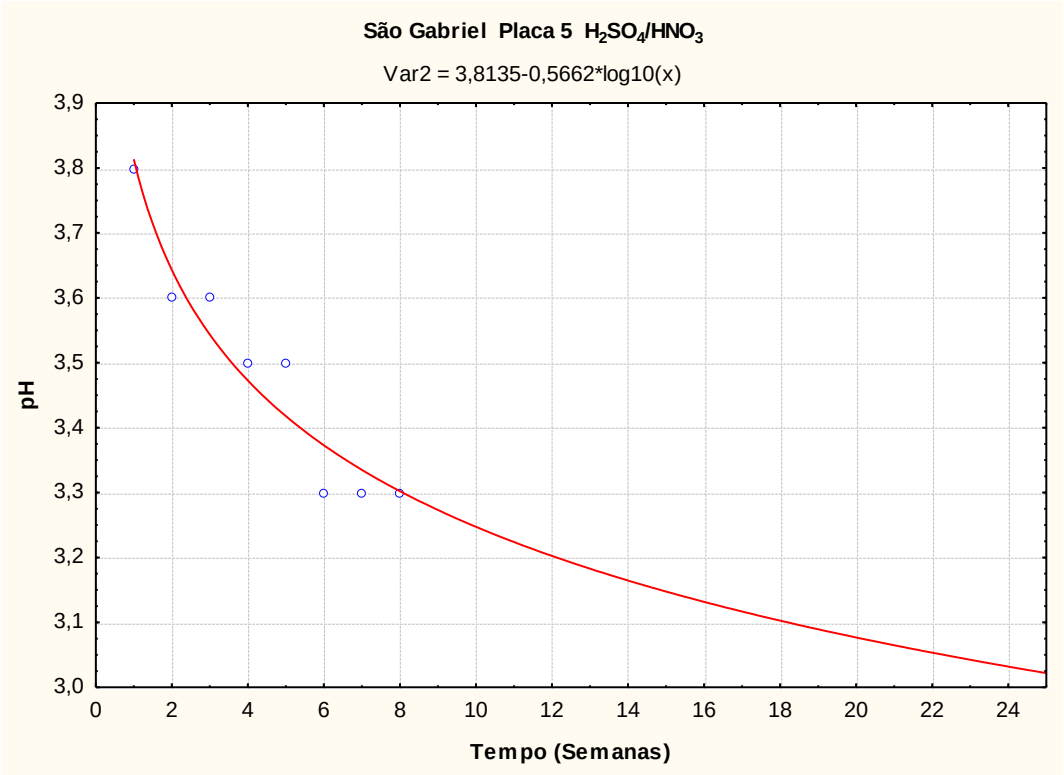


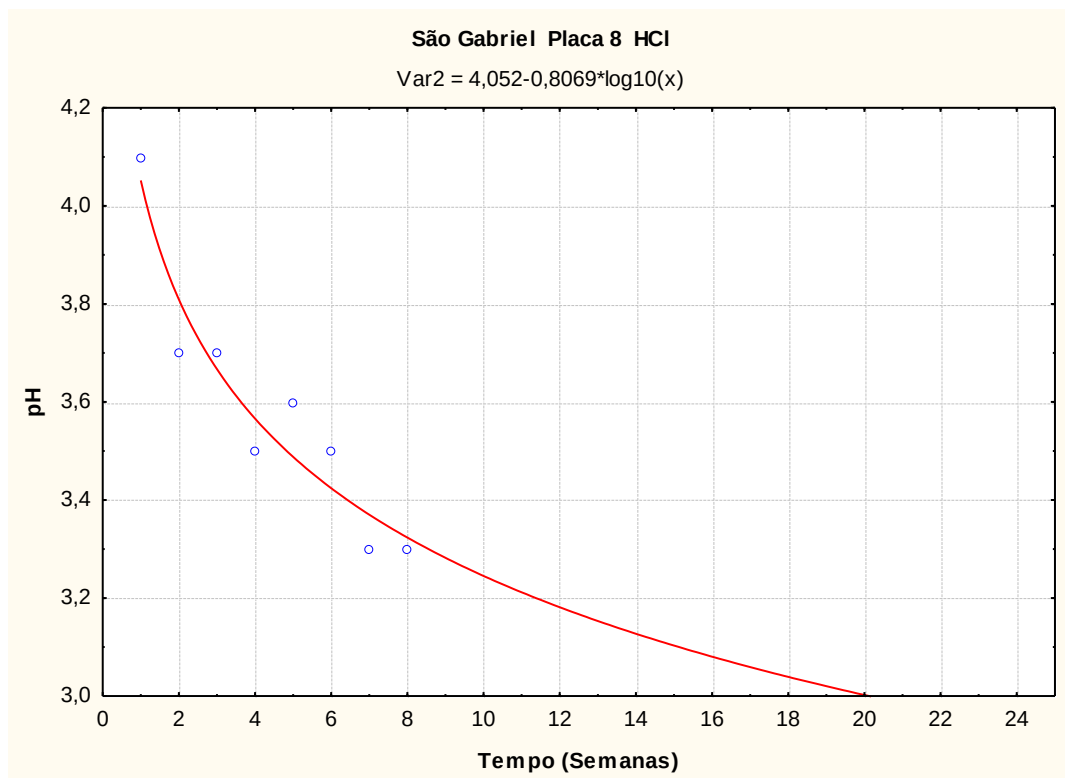
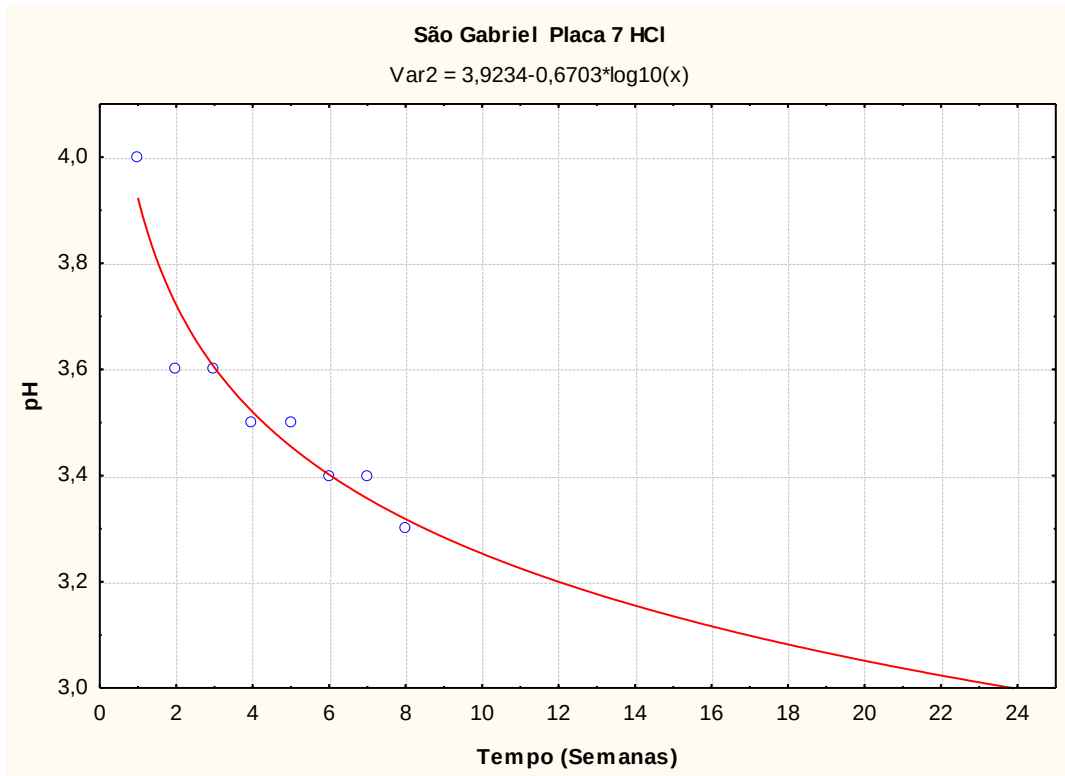


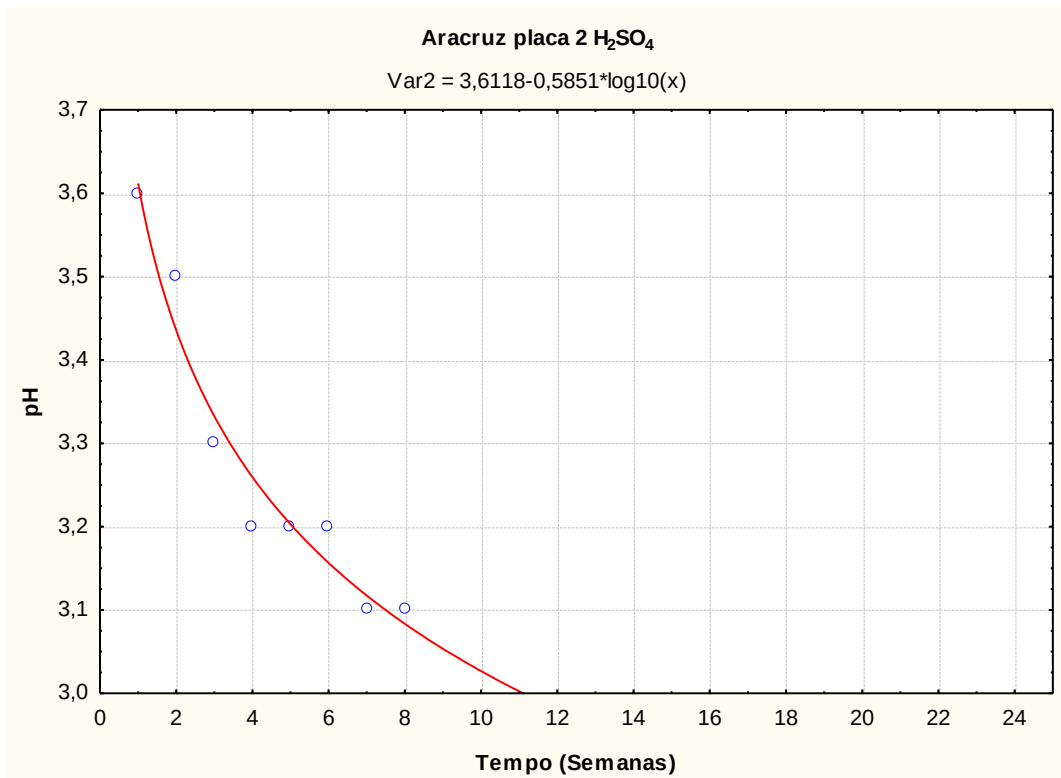
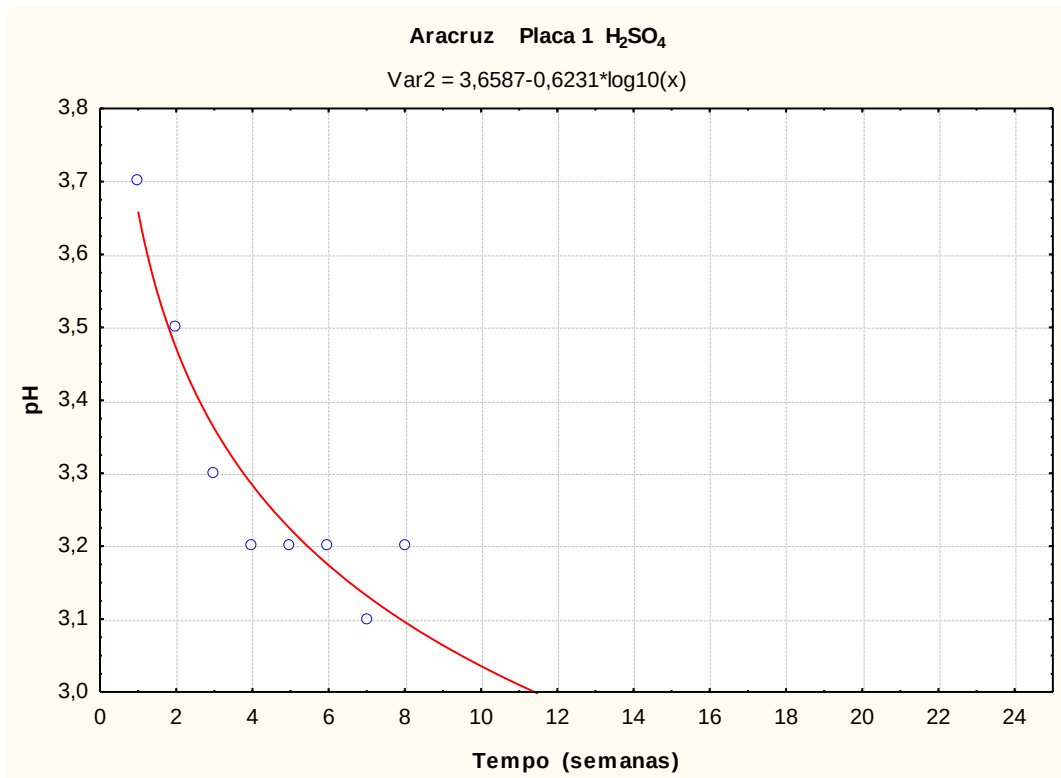


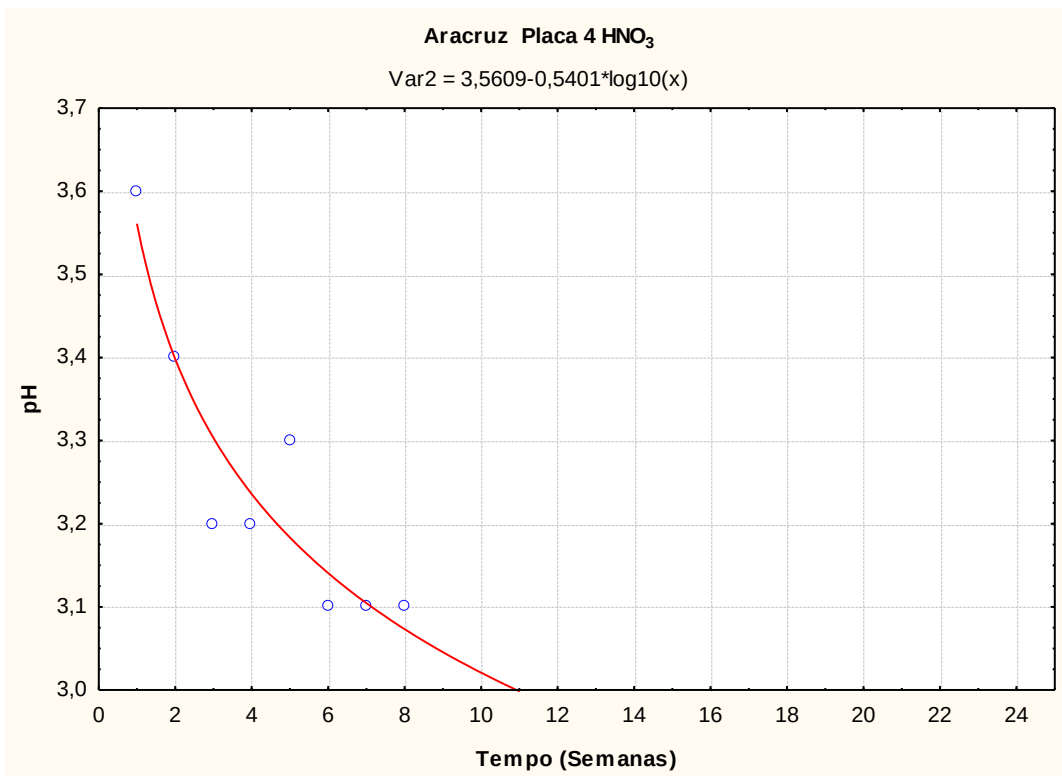
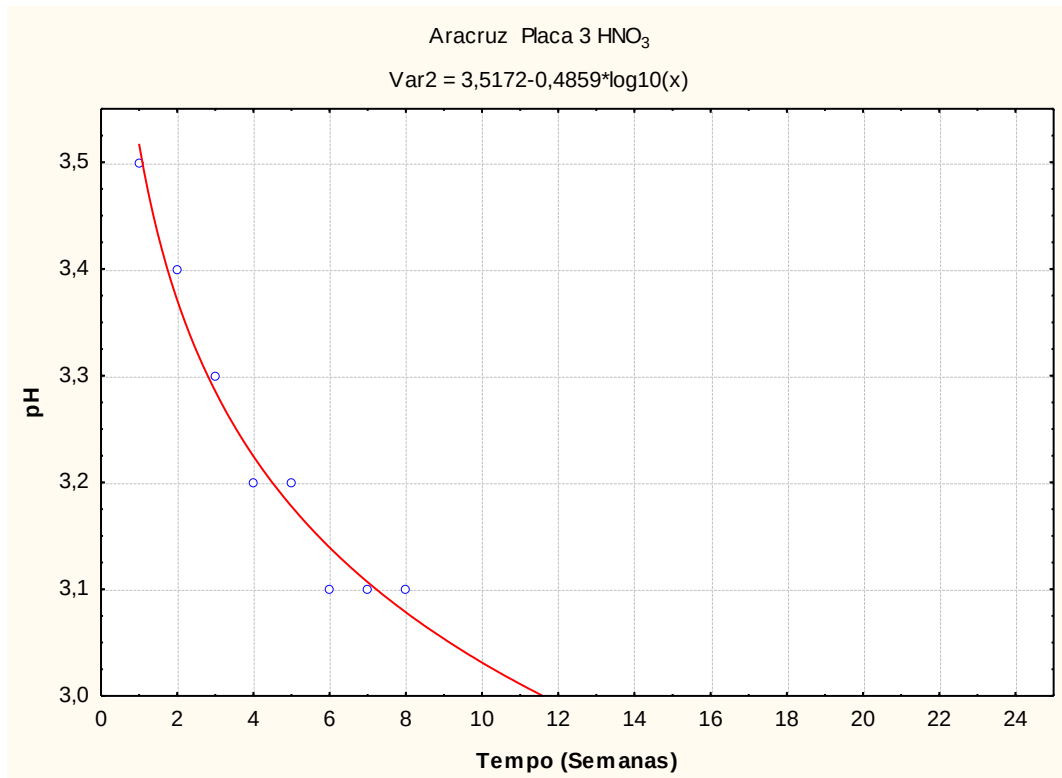


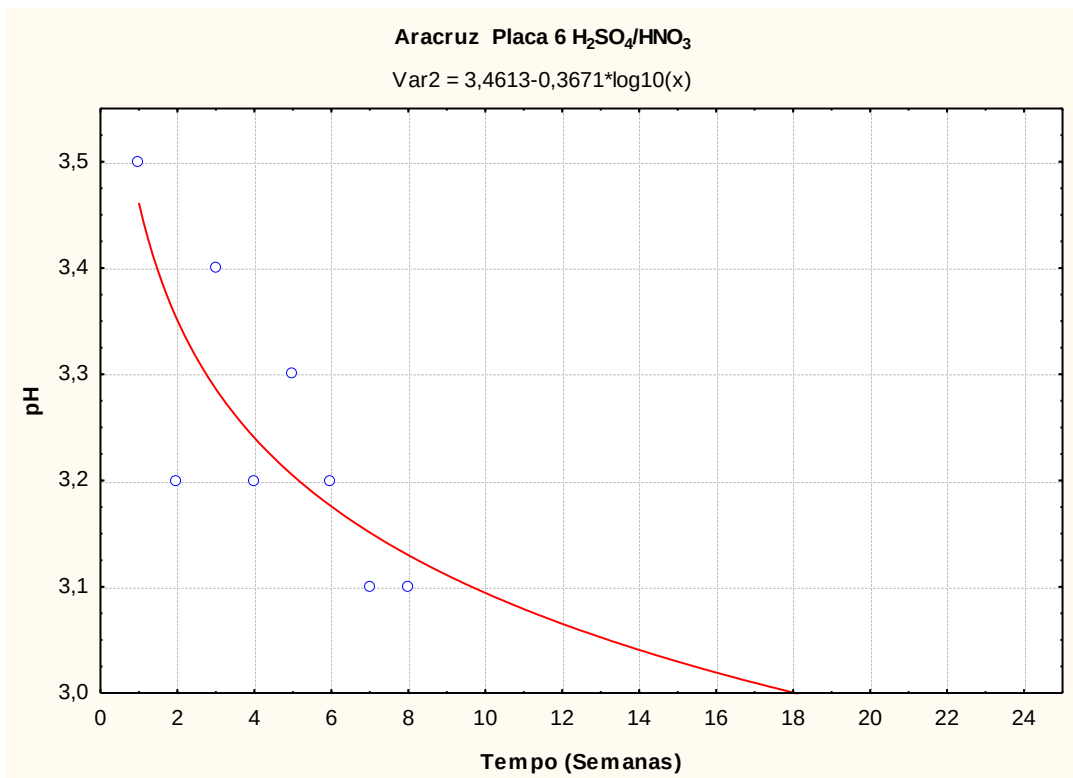
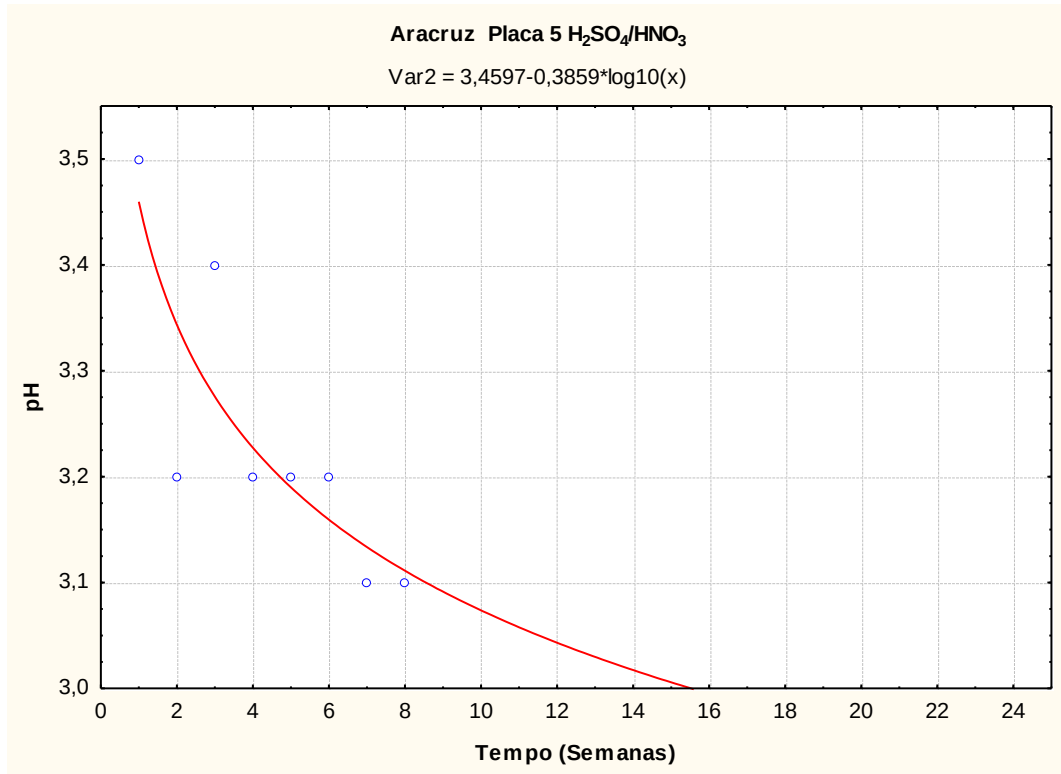


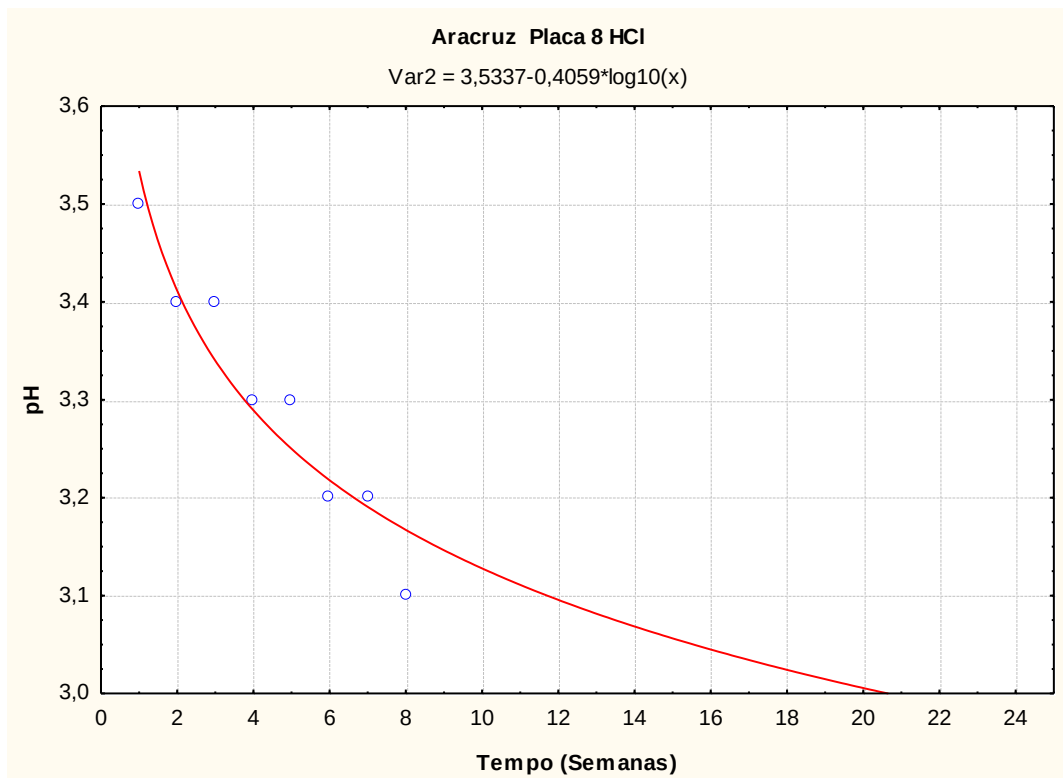
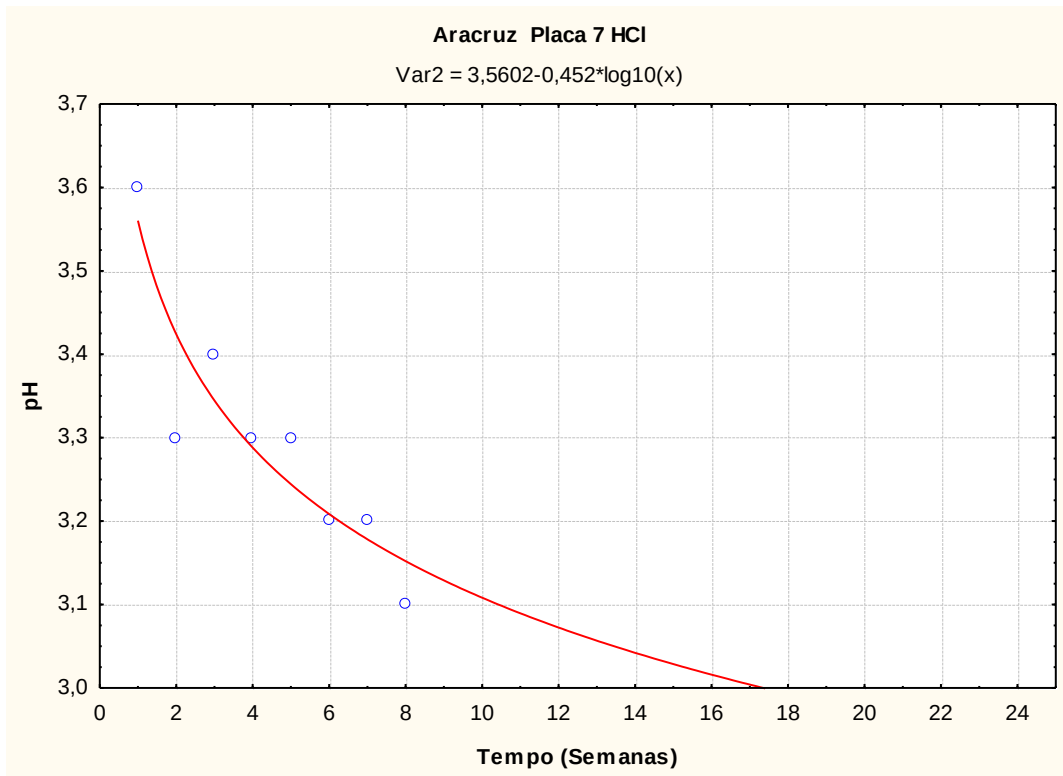






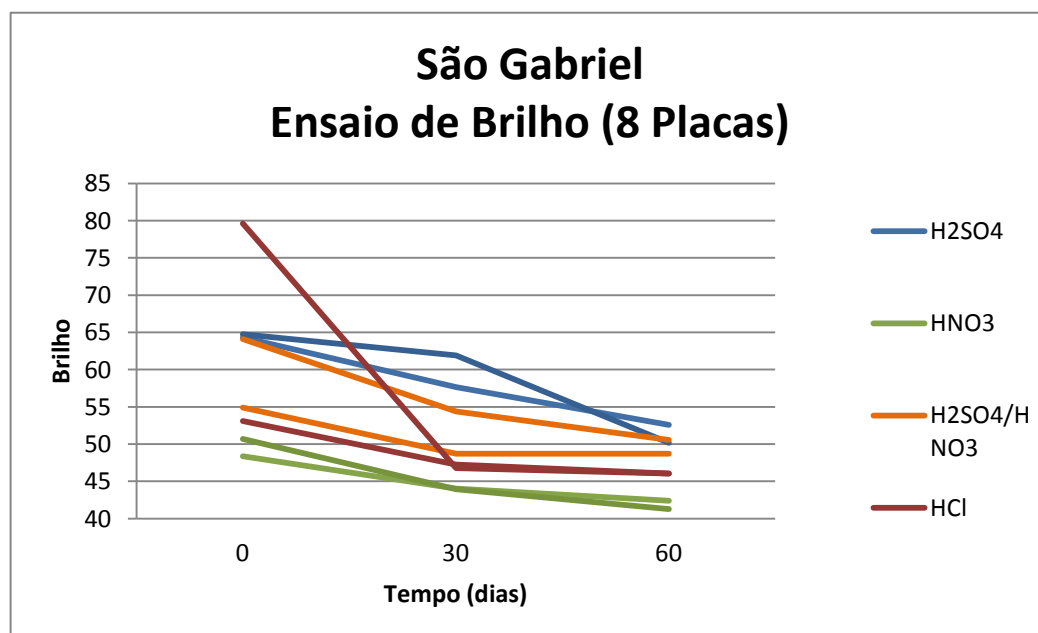
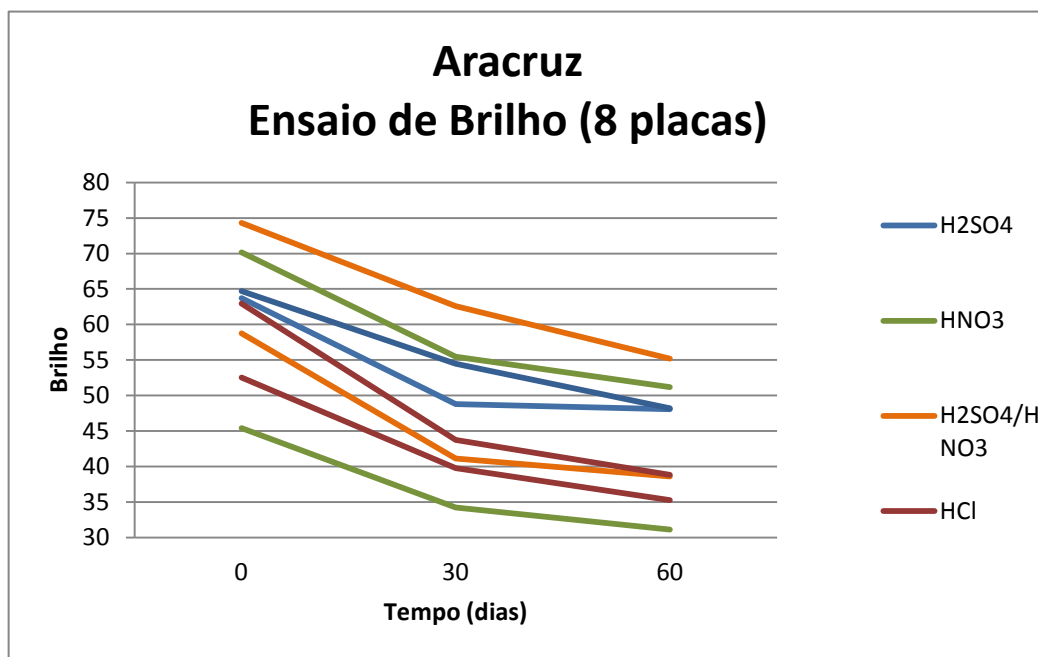


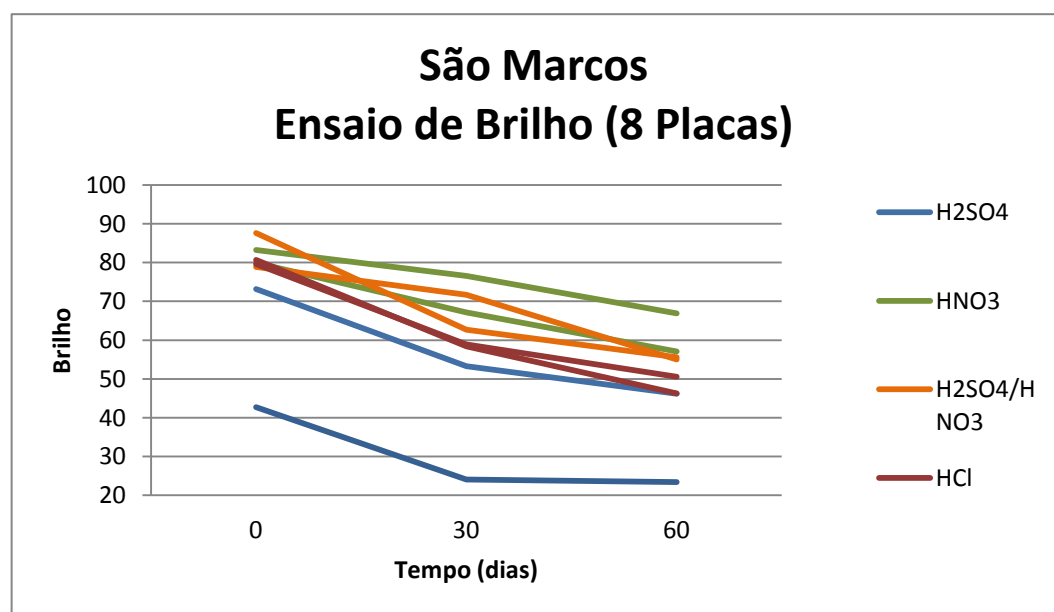
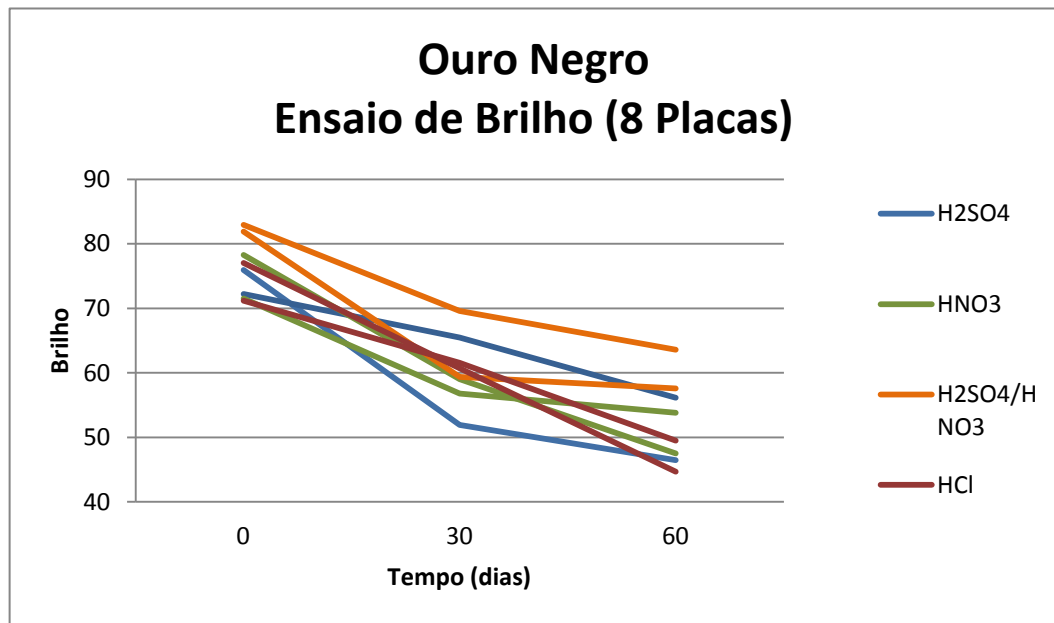




ANEXO VI

Diagramas de duas variáveis: brilho x tempo dos litotipos estudados





ANEXO VII

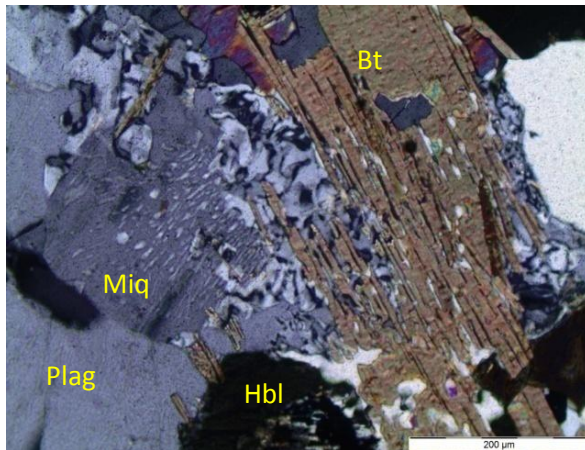
Tabela da Composição Modal

MATERIAIS		COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA (%)						
		Plagioclásio	Piroxênio	Biotita	Hornblenda	Opacos	Titanita	Acessórios
Nome Comercial	Classificação Petrográfica							
Ouro Negro	Gabro norito	63,1	8,9	17,27	6,31	4,6	-	2
Aracruz	Anfibolito	44,5	-	2,88	48,4	3,52	1	2
São Gabriel	Diorito norito	41,8	24	17,7	8	7,2	1,2	2
São Marcos	Biotita diorito	59,8	14,35	20,4	3,86	1,65	-	1
São Francisco	Diorito gabro	42	30	15	8	3	-	2

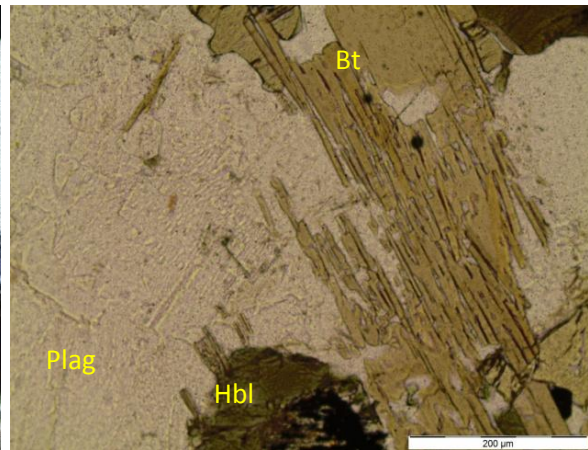
ANEXO VIII

Fotomicrografias dos litotipos estudados

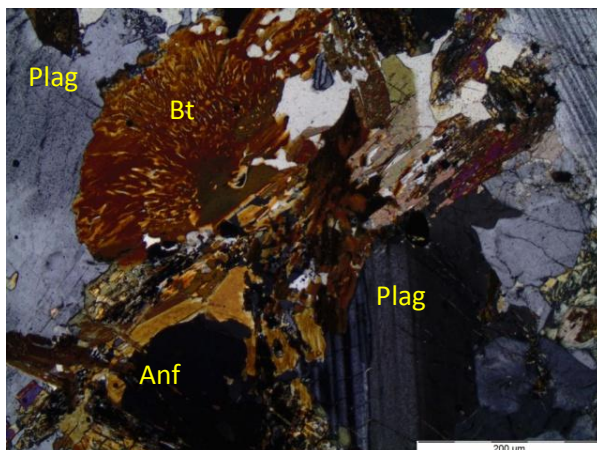
Fotomicrografia do Ouro Negro



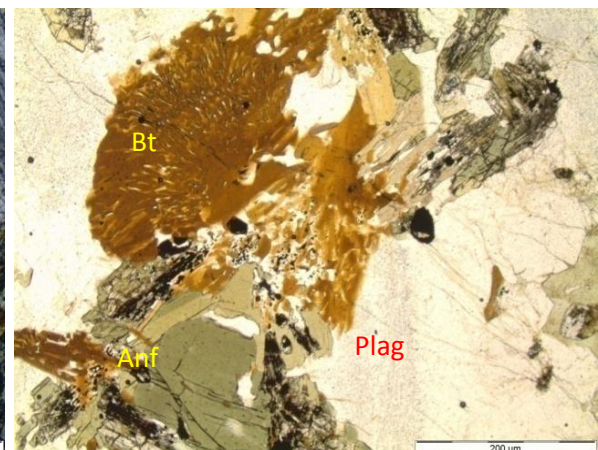
Fotomicrografia em luz ortoscópica (A)



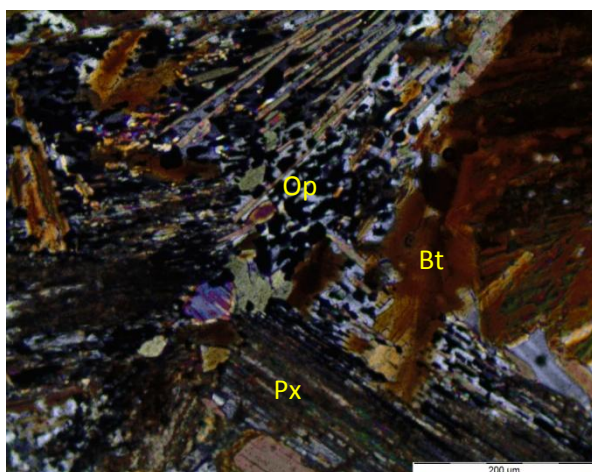
Fotomicrografia em luz natural polarizada (B)



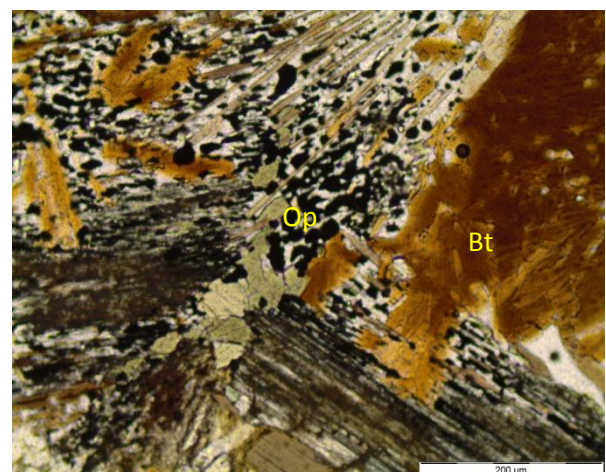
Fotomicrografia em luz ortoscópica (C)



Fotomicrografia em luz natural polarizada (D)

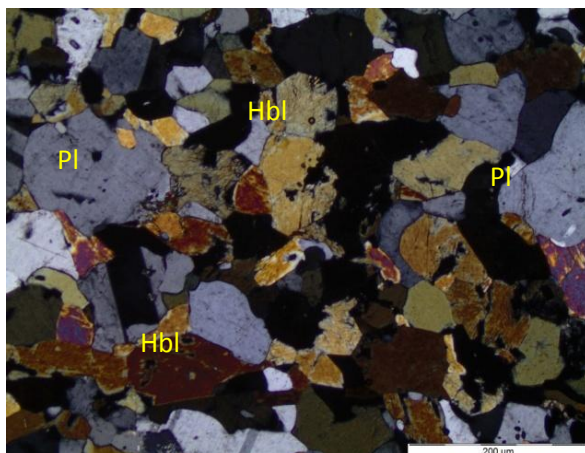


Fotomicrografia em luz ortoscópica (E)

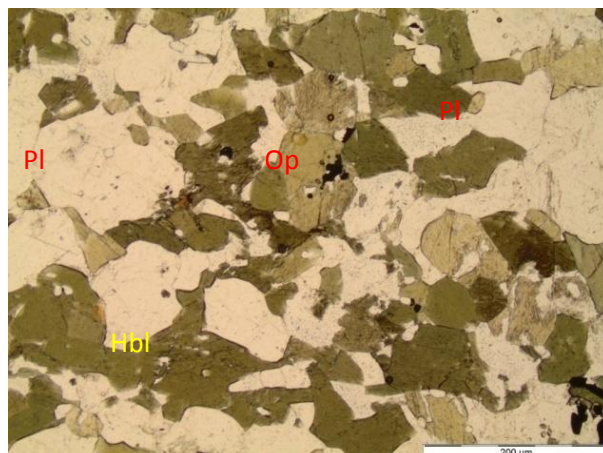


Fotomicrografia em luz natural polarizada (F)

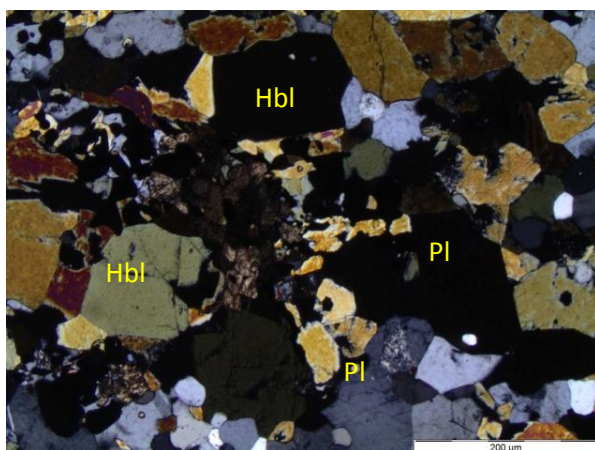
Fotomicrografia do Aracruz



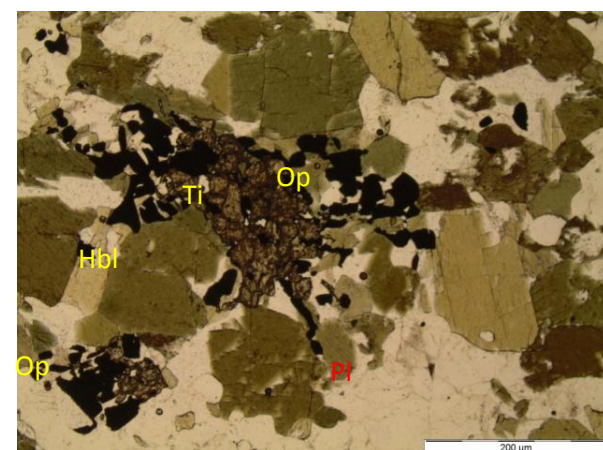
Fotomicrografia em luz ortoscópica (A)



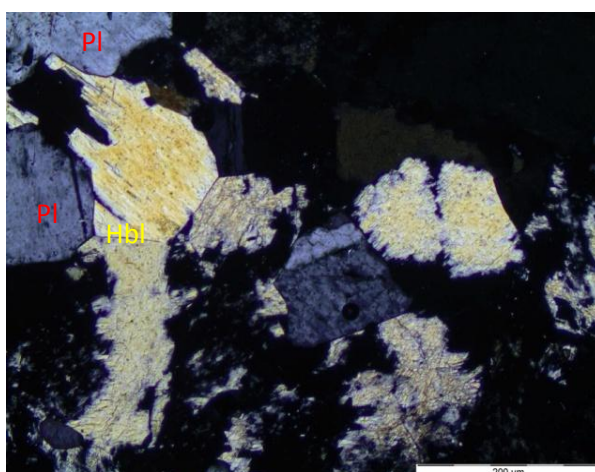
Fotomicrografia em luz natural polarizada (B)



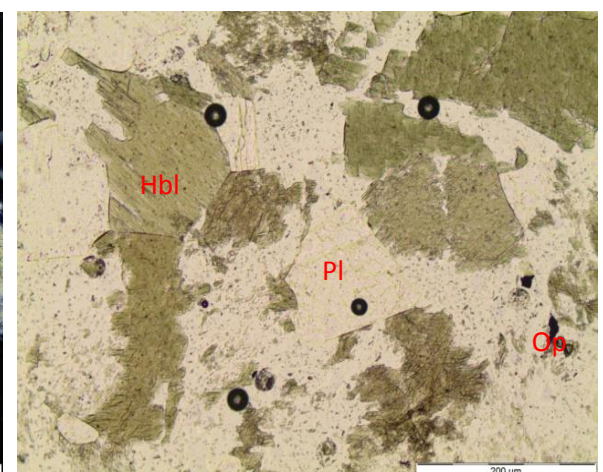
Fotomicrografia em luz ortoscópica (C)



Fotomicrografia em luz natural polarizada (D)

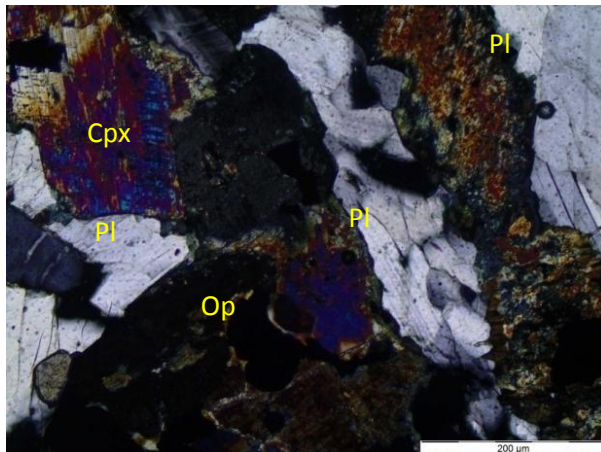


Fotomicrografia em luz ortoscópica (E)

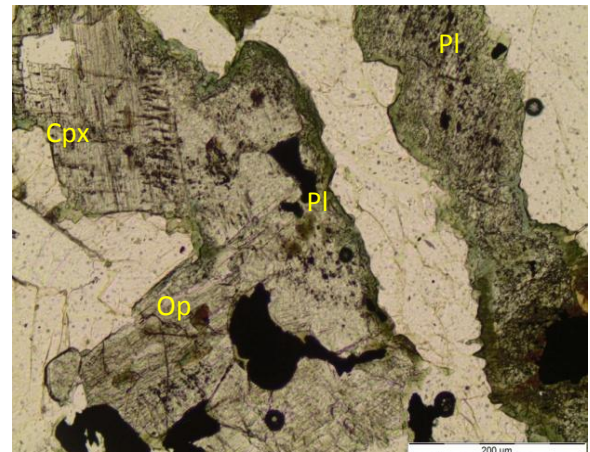


Fotomicrografia em luz natural polarizada (F)

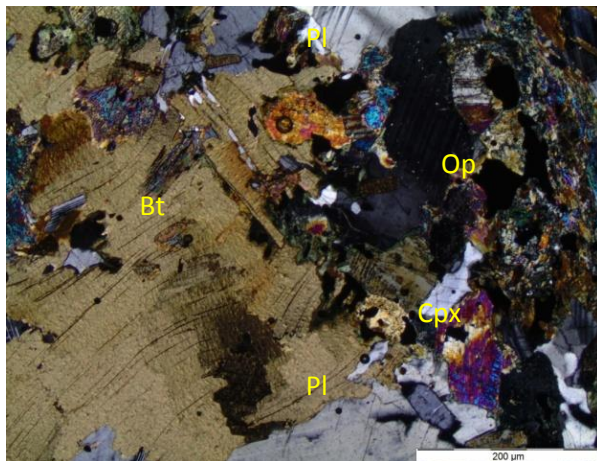
Fotomicrografia do São Gabriel



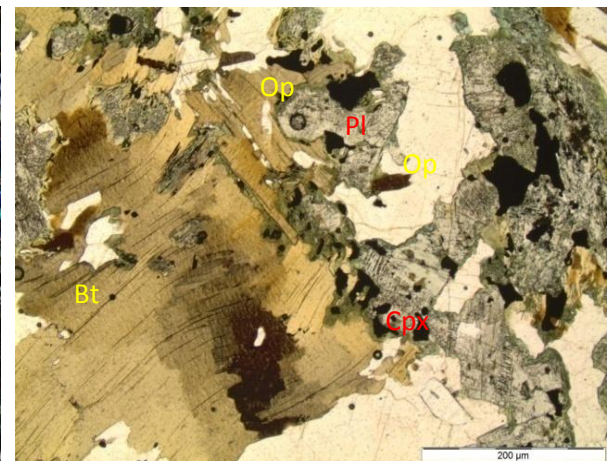
Fotomicrografia em luz ortoscópica (A)



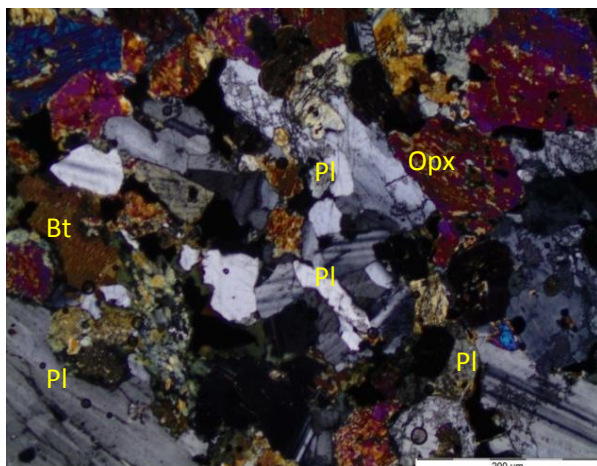
Fotomicrografia em luz natural polarizada (B)



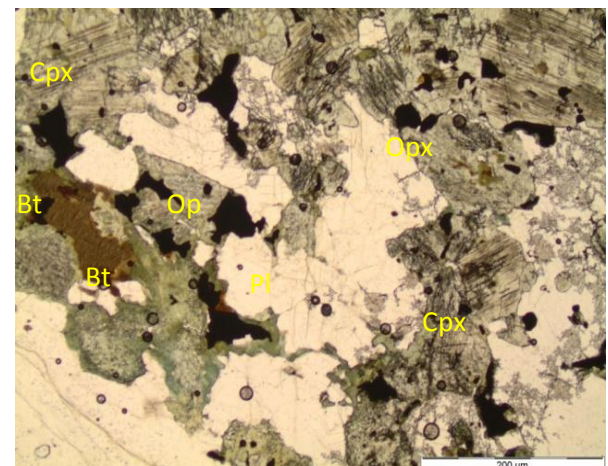
Fotomicrografia em luz ortoscópica (C)



Fotomicrografia em luz natural polarizada (D)

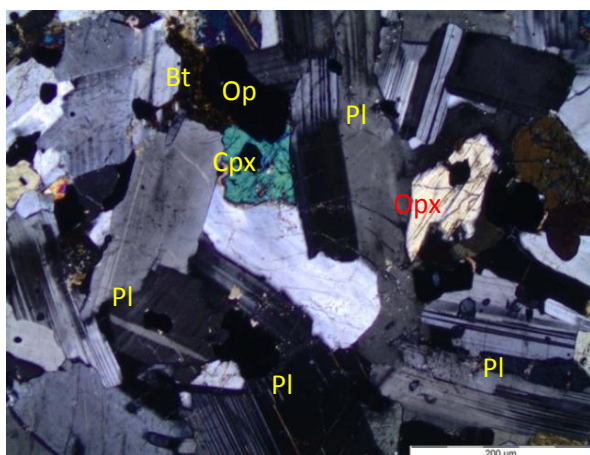


Fotomicrografia em luz ortoscópica (E)

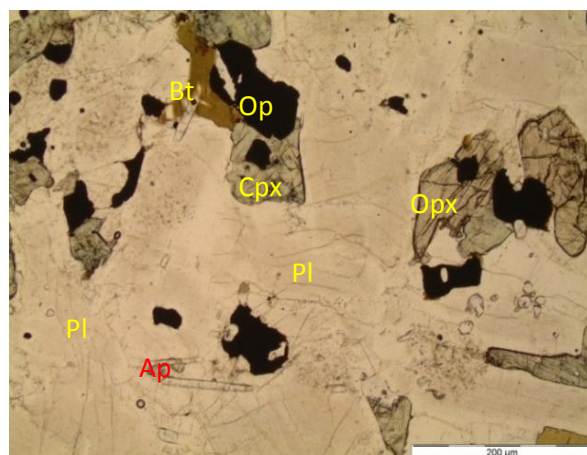


Fotomicrografia em luz natural polarizada (F)

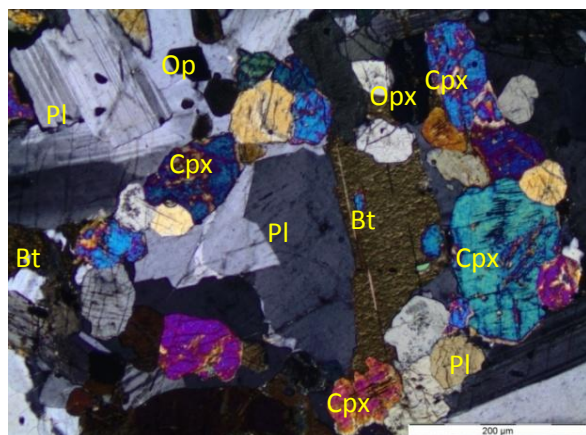
Fotomicrografia do São Marcos



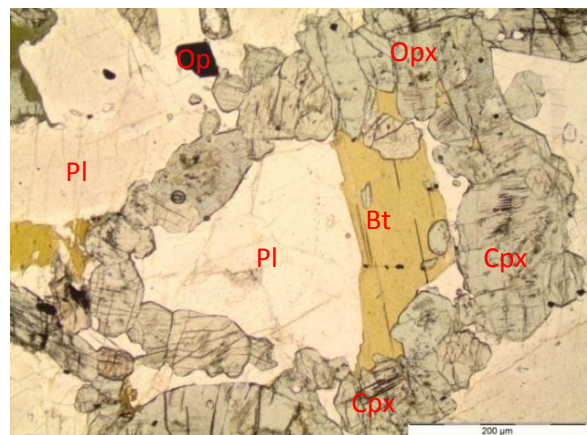
Fotomicrografia em luz ortoscópica (A)



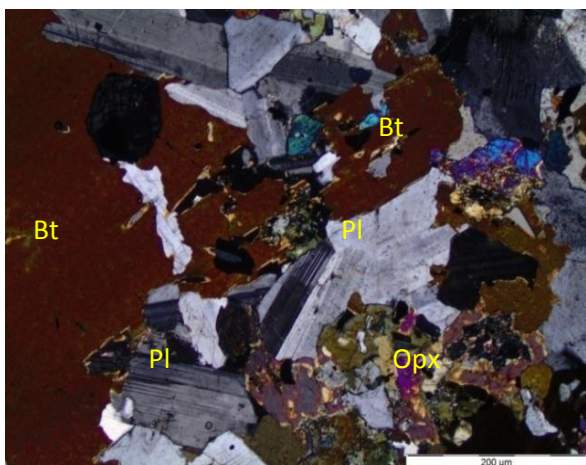
Fotomicrografia em luz natural polarizada (B)



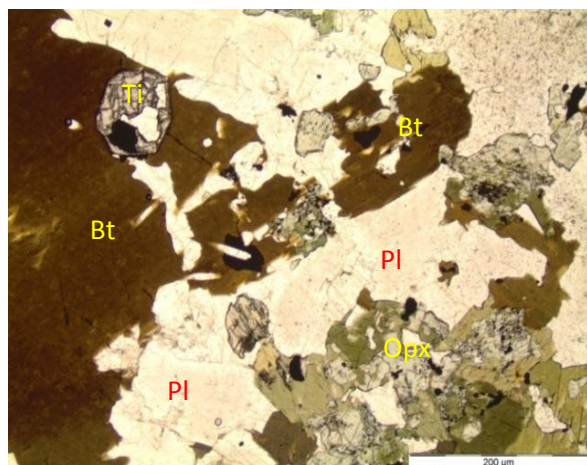
Fotomicrografia em luz ortoscópica (C)



Fotomicrografia em luz natural polarizada (D)



Fotomicrografia em luz ortoscópica (E)



Fotomicrografia em luz natural polarizada (F)

ANEXO IX

Tabela de medição das placas para todos os materiais

ARACRUZ (AC)

Amostra	Volume	P seco	P úmido	P _{úmido} - P _{seco}
AC P1	55380	168,10	168,37	0,27
AC P2	53652	163,24	163,51	0,27
AC P3	53640	160,63	160,92	0,29
AC P4	54781	165,86	166,15	0,29
AC P5	54743	165,31	165,57	0,26
AC P6	55000	165,65	165,93	0,28
AC P7	54630	163,71	163,97	0,26
AC P8	55172	168,27	168,54	0,27

SÃO MARCOS (SM)

Amostra	Volume	P seco	P úmido	P _{úmido} - P _{seco}
SM P1	59831	168,48	168,63	0,15
SM P2	60393	170,28	170,46	0,18
SM P3	57886	169,20	169,33	0,13
SM P4	58817	167,90	168,03	0,13
SM P5	60112	167,31	167,45	0,14
SM P6	59880	171,74	171,88	0,14
SM P7	58634	168,48	168,61	0,13
SM P8	57699	161,45	161,61	0,16

OURO NEGRO (ON)

Amostra	Volume	P seco	P úmido	P _{úmido} - P _{seco}
ON P1	50400	141,96	142,12	0,16
ON P2	50760	142,88	143,01	0,13
ON P3	50500	142,54	142,70	0,16
ON P4	50240	140,71	140,84	0,13
ON P5	50355	141,65	141,81	0,16
ON P6	50285	142,44	142,61	0,17
ON P7	50330	140,98	141,13	0,15
ON P8	50632	142,87	143,01	0,14

SÃO GABRIEL (SG)

Amostra	Volume	P seco	P úmido	P _{úmido} - P _{seco}
SG P1	57699	174,97	175,12	0,15
SG P2	58534	174,97	175,16	0,19
SG P3	58767	175,62	175,80	0,18
SG P4	56853	171,40	171,57	0,17
SG P5	57340	171,07	171,23	0,16
SG P6	59241	171,56	171,74	0,18
SG P7	56849	167,01	167,17	0,16
SG P8	55193	164,02	164,16	0,14

ANEXO X

Resultados dos valores médios dos ensaios de brilho (n= 27 medições) dos litotipos estudados, em diferentes tempos de distintos ataques ácidos.

Ouro Negro				
Placas	Tempo			Ácidos
	T=0	T=30 dias	T=60 dias	
1	75,92	51,92	46,48	H ₂ SO ₄
2	72,22	65,48	56,14	
3	71,55	56,81	53,81	HNO ₃
4	78,29	59,00	47,51	
5	81,88	59,37	57,59	H ₂ SO ₄ /HNO ₃
6	82,92	69,59	63,59	
7	71,18	61,55	49,48	HCl
8	77,03	60,70	44,70	

São Marcos				
Placas	Tempo			Ácidos
	T=0	T=30 dias	T=60 dias	
1	73,14	53,29	46,22	H ₂ SO ₄
2	42,74	24,03	23,40	
3	79,92	67,14	57,11	HNO ₃
4	83,24	76,55	66,92	
5	78,85	71,66	55,03	H ₂ SO ₄ /HNO ₃
6	87,59	62,70	55,59	
7	80,66	58,41	46,29	HCl
8	79,62	58,88	50,55	

São Gabriel				
Placas	Tempo			Ácidos
	T=0	T=30 dias	T=60 dias	
1	64,33	57,66	52,59	H_2SO_4
2	61,92	50,18	64,74	
3	48,37	44,03	42,37	HNO_3
4	50,70	43,96	41,29	
5	54,92	48,70	48,70	$\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$
6	64,11	54,37	50,55	
7	53,11	47,25	46,03	HCl
8	79,62	46,77	46,03	

Aracruz				
Placas	Tempo			Ácidos
	T=0	T=30 dias	T=60 dias	
1	63,70	48,81	48,07	H_2SO_4
2	64,70	54,48	48,18	
3	70,14	55,44	51,18	HNO_3
4	45,40	34,22	31,11	
5	74,33	62,59	55,18	$\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$
6	58,74	41,14	38,62	
7	52,55	39,77	35,25	HCl
8	62,96	43,74	38,81	

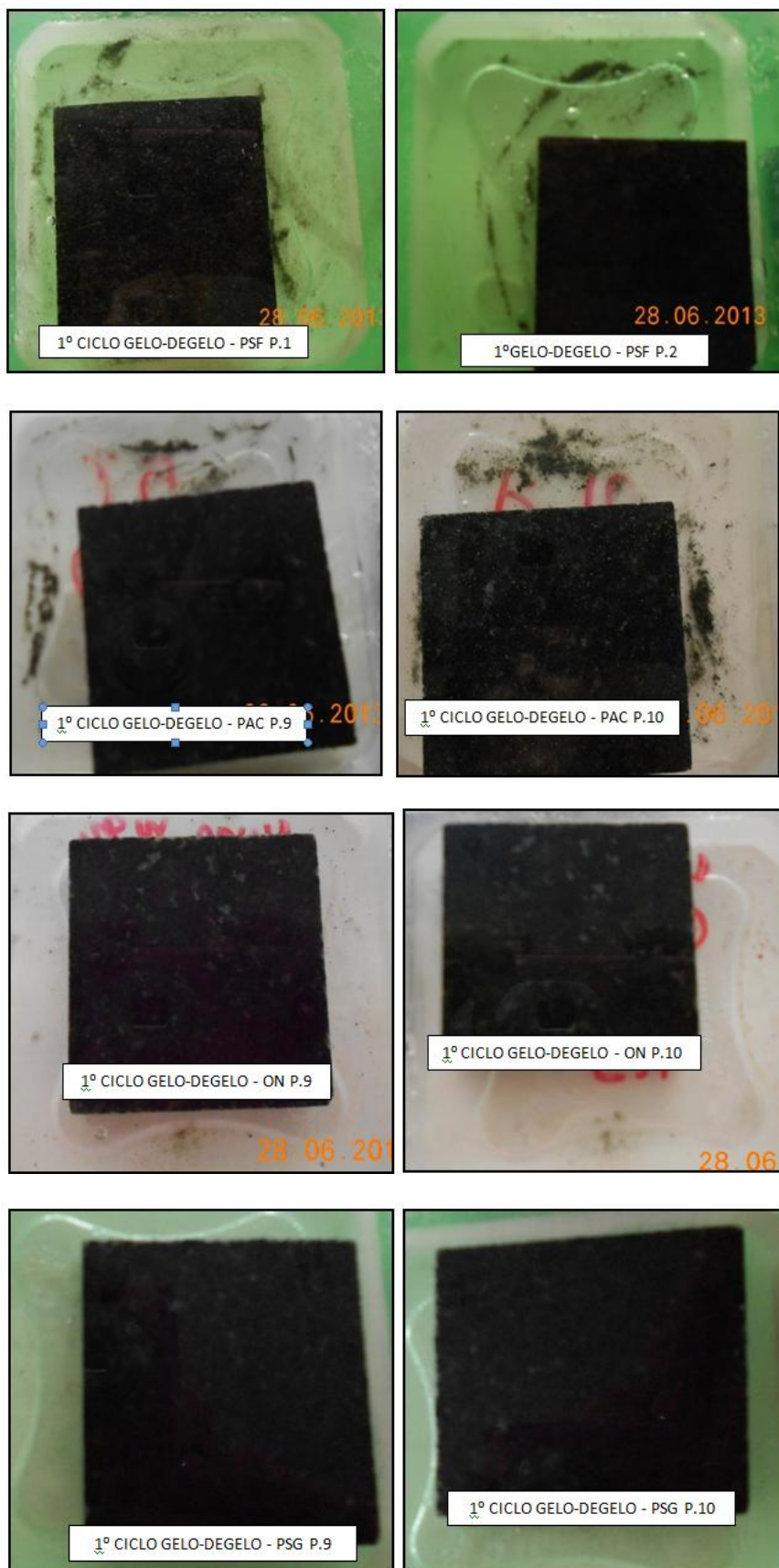
ANEXO XI

Resultados de percentual de perda de dos litotipos estudados ao final dos 2 ciclos do ensaio gelo-degelo

Peso Seco para Gelo-degelo					Percentual de perda (g)
Material	Amostras	Tempo			
		T=0	T=25	T=50	
Aracruz	9	164,35	164,17	164	0,35
	10	165,74	165,53	165,4	0,34
São Gabriel	9	170,71	170,65	170,65	0,06
	10	172,18	172,09	172,02	0,16
São Marcos	9	169,82	169,67	169,64	0,18
	10	169,17	168,99	168,96	0,21
Ouro Negro	9	141,48	141,32	141,25	0,23
	10	141,72	141,55	141,32	0,4
São Francisco	1	145,37	145,21	145,12	0,25
	2	147,15	146,98	146,9	0,25

ANEXO XII

Fotos do ensaio de gelo-degelo 1^o ciclo todos os litotipos estudados



ANEXO XIII

Tabela de análises químicas (Elementos maiores)

Amostras	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ (T)	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Total
Sao Gabriel	46,76	13,5	14,61	0,17	6,1	8,52	2,75	1,9	4,003	0,24	0	98,56
Aracruz	49,71	13,08	15,08	0,22	5,39	9,75	2,81	0,7	2,637	0,37	0	99,76
Sao Marcos	53	16,33	11,89	0,17	4,4	6,47	3,87	2,32	2,005	0,39	0	100,8
Ouro Negro	54,31	15,83	9,05	0,12	4,28	6,85	3,16	2,35	1,847	1,07	0	98,86
São Francisco	45,26	13,99	17,1	0,16	6,03	9,57	2,36	1,67	2,74	0,37	0,3	99,55