

PROPOSTA METODOLÓGICA DE PESQUISA PARA ROCHAS ORNAMENTAIS

Fernando Antônio Castelo Branco Sales^{1} e Jáder Onofre de Moraes^{2*}*

¹Mestre em Rochas Ornamentais e Geólogo do Departamento de Geociências da Universidade Estadual do Ceará.

²PhD em Geologia Ambiental e Professor Titular do Departamento de Geociências da Universidade Estadual do Ceará.

*Depto. de Geociências/UECE - Av. Paranjana, 1700 – Campus do Itaperi – 60.740-000 – Fortaleza – CE
Fone: (85) 299-2678

RESUMO

A carência de conhecimento prospectivos na identificação das características geológicas e tecnológicas no sentido de qualificar e quantificar os mais variados litotipos para fins ornamentais é marcante no setor. O desconhecimento do método e tecnologia adequada ao tipo de jazida também muitas vezes contribui negativamente para os insucessos do empreendimento do projeto de mineração.

Dessa forma tem-se observado queima de etapas, onde os empresários por falta de interesse, desconhecimento ou visando erroneamente reduzir custos não deram a devida importância à pesquisa geológica antes e durante o processo de exploração de suas pedreiras.

Essas frustrações têm levado os empresários a tomar consciência da necessidade de execução de uma prospecção e pesquisa geológica através de mapeamento geológico/estrutural, métodos geofísicos e sondagens rotativas, tendo como finalidade definir ao máximo a presença e distribuição espacial das descontinuidades (falhas, veios fraturas de resfriamento e /ou tectônicas), bem como os defeitos da massa granulométrica (anomalias e diferenciações de composição, presença de xenólitos, nódulos de oxidação dentre outros) capazes de interferir no padrão e comercialização do material explorado.

O processo inicial de uma prospecção pode ser fundamentado no conhecimento prévio de alguns fatores essenciais que a jazida e a rocha devam possuir, a fim de reduzir a relação entre o benefício esperado e o risco inerente ao desconhecimento das características geológicas da rocha a ser explorada. Estes fatores podem ser classificados dentro de dois aspectos: propriedades específicas dos afloramentos e fatores condicionantes da exploração.

De posse dos conhecimentos relacionados anteriormente, a pesquisa pode desenvolver-se em seis fases. A Figura 1 mostra um esquema geral do plano de trabalho para investigação de rochas ornamentais.

De posse desses estudos procede-se-á a abertura da frente de lavra, utilizando o método e a tecnologia que mais se adequou com o resultado da pesquisa realizada.

INTRODUÇÃO

A falta de estudos no sentido de identificar, qualificar e quantificar os materiais a serem explorados tem levado o setor de rochas ornamentais a experiências que muitas vezes não lhe são favoráveis. Investir em equipamentos novos e modernos para a extração e beneficiamento tem sido a maneira que o setor tem adotado ao longo dos anos na busca de tornar-se mais competitivo. A experiência tem demonstrado que dispor de máquinas de última geração e tecnologias de lavras avançadas não tem sido suficiente para tornar-se competitivo no mercado. Julgamos necessário também o conhecimento das características geológicas/estruturais das rochas fatores que condicionam o padrão estético dos materiais (cada vez mais exigido pelo mercado consumidor) e que interferem diretamente na recuperação, vida útil da jazida e na minimização dos impactos ambientais inerentes de tal atividade.

Tem-se verificado queima de etapas, onde os empresários por falta de interesse, desconhecimento ou visando erroneamente reduzir custos não deram a devida importância à pesquisa geológica antes e durante o processo de exploração de suas pedreiras. Torna-se comum os maciços rochosos e matacões serem lavrados de maneira predatória, levando-se mais em conta a intuição e experiência de campo que os estudos técnicos de detalhes, gerando perda de lucratividade e competitividade, chegando inclusive ao abandono da extração, acarretando danos irreparáveis ao meio ambiente e frustrações nas expectativas das comunidades, que têm visto na mineração a alternativa para minimizar seus problemas sociais.

Essas frustrações têm levado os empresários a tomar consciência da necessidade de execução de uma prospecção e pesquisa geológica através de mapeamento geológico/estrutural, métodos geofísicos e sondagens rotativas, tendo como finalidade definir ao máximo a presença e distribuição espacial das descontinuidades (falhas, veios fraturas de resfriamento e/ou tectônicas), bem como os defeitos da massa granulométrica (anomalias e diferenciações de composição, presença de xenólitos, nódulos de oxidação dentre outros) capazes de interferir no padrão e comercialização do material explorado.

CONHECIMENTOS FUNDAMENTAIS PARA O ESTABELECIMENTO DE UMA PROSPECÇÃO

O processo inicial de uma prospecção pode ser fundamentado no conhecimento prévio de alguns fatores essenciais que a jazida e a rocha devam possuir, a fim de reduzir a relação entre o benefício esperado e o risco inerente ao desconhecimento das características geológicas da rocha a ser explorada.

Estes fatores podem ser classificados dentro de dois aspectos:

- a) Propriedades específicas dos afloramentos
 - Grau de Fraturamento
 - Características da rocha
 - Composição
 - Cor
 - Tamanho dos grãos
 - Homogeneidade
 - Oxidação
 - Propriedades físicas e mecânicas
 - Outras alterações

O estudo do grau de fraturamento visando principalmente definir o número de família de diáclases e os espaçamentos e as direções entre elas são fatores que irão definir o método de lavra e o tamanho dos blocos a serem extraídos. Uma rede de diáclase pouco espaçada invalida o uso da rocha com fins ornamentais; um diaclasamento médio permite a extração de blocos comerciais só em certos setores (o que representa um nível de aproveitamento de baixo a médio do maciço rochoso), gerando grande volume de rejeitos e conseqüentemente impacto ambiental relacionado principalmente à disposição desse rejeito ao longo da área. Um diaclasamento escasso favorece a obtenção de blocos com tamanho e qualidade melhor ocasionando, portanto, um aproveitamento maior do jazimento.

O conhecimento da composição mineralógica, o tamanho dos grãos, a textura e a cor da rocha são de grande interesse já que são propriedades que condicionam decisivamente seu caracter ornamental. Ao contrário das outras propriedades tecnológicas não há como dimensionar a beleza de uma pedra polida, já que o seu valor estético pode ser alto para uns e baixo para outros. A cor de uma pedra é um fator bastante significativo sob o ponto de vista comercial da mesma.

A homogeneidade de uma rocha é função da densidade de fraturamentos, da presença de veios, da constância mineralógica e textural, ocorrência de enclaves, etc.

Cada vez mais o mercado consumidor passa a exigir material de qualidade, pois blocos que apresentam alguns destes aspectos são rejeitados, entulhando o pátio da pedreira ou são dispostos como "bota fora", muitas vezes sem um planejamento adequado, prejudicando, inclusive, o avanço da frente de lavra.

A incidência alta destes aspectos gera uma baixa recuperação do material a ser lavrado, podendo

inviabilizar a pedreira, causando danos irreparáveis ao meio ambiente.

A oxidação é um fator que deve ser levado em conta no aproveitamento do jazimento já que sua presença e distribuição, por si mesma pode obrigar o abandono da pedreira. A oxidação, caso exista, tem que estar distribuída de maneira homogênea ao longo da chapa, dando uma tonalidade amarela que em alguns casos pode enaltecer o valor comercial do material.

A caracterização tecnológica da rocha é importante para saber se o material a ser lavrado satisfaz as necessidades da aplicabilidade a que se destina.

Estas propriedades físicas e mecânicas são geralmente dimensionadas pela resistência a compressão, dilatação, absorção d'água, dureza média da rocha e pela abrasão. Vale ressaltar que a presença de minerais solúveis ou facilmente carreados pelas águas provoca rapidamente a formação de cavidades de dissolução, fato este que prejudica o seu valor estético.

Outras alterações importantes a serem observadas dizem respeito à presença e à intensidade de meteorização da rocha. Uma meteorização é baixa quando a crosta de alteração é menor ou igual a 2cm, média se a crosta alterada está em torno de 2 a 20cm e alta se for maior que 20cm.

- b) Fatores condicionantes da exploração
 - Topografia, acesso, infra-estrutura
 - Tamanho do afloramento
 - Existência de pedreiras próximas
 - Cobertura do solo e de estéril
 - Impacto ambiental que poderá ocasionar a pedreira
 - Mercado

A localização uma pedreira deve apresentar condições ideais para alojamentos, implantação de uma praça de fácil locomoção dos equipamentos e, sobretudo, é importante saber a distância da mesma com relação às linhas férreas, porto e condições de via de acesso rodoviário para o escoamento da produção de blocos. Este aspecto é muito importante na abertura de uma pedreira pois dele depende o sucesso econômico da exploração de alguns materiais.

No tocante à localização da pedreira, outro aspecto de suma importância não só para a atividade propriamente dita, mas também sobre os danos causados ao meio ambiente diz respeito à morfologia da região. Com relação a topografia, as pedreiras podem localizar-se em áreas de serra (no pé do relevo, no talude, ou no topo) e planícies.

Em pedreiras localizadas no sopé da montanha o impacto paisagístico é modesto devido ao ângulo de visibilidade ser baixo e o desenvolvimento da pedreira ser mais na horizontal que na vertical, a visibilidade do bota-fora é menor e pode ser encoberto por barreira vegetal ou posicionados de tal maneira que se assemelhe a

morfologia natural do relevo. A recuperação final da área é fácil podendo recorrer a usos alternativos. Devido ao posicionamento dessas pedreiras que estão em contato com a planície pode ocorrer contaminação das águas superficiais e subterrâneas, interferindo na qualidade e quantidade das mesmas através da contaminação por pó, óleos, graxas, combustíveis e explosivos, dentre outros. As pedreiras situadas nestas condições permitem uma grande produção, facilidade de acesso, escoamento e manejo dos equipamentos, e os riscos com acidentes são menores.

Pedreiras localizadas no talude das serras com inclinação em torno de 40° a 60° não têm espaço para desenvolver-se na horizontal, seu desenvolvimento no sentido vertical gera um alto impacto paisagístico devido tanto à frente de lavra como à disposição do bota-fora. O acesso não é fácil e torna-se mais visível. O manejo com os equipamentos é dificultado e são pedreiras de baixa produção, a recuperação da área é difícil e de custo elevado.

Em pedreiras localizadas no topo da serra o impacto sobre o meio ambiente gerado pela frente de lavra é secundário (fácil de disfarçar), no topo da serra o ângulo de visão é menor, porém os rejeitos lançados nas encostas constituem um grande impacto ambiental favorecendo uma zona de vulnerabilidade. São pedreiras de difícil acesso, podendo ocorrer a destruição naturalista de monumentos geológicos interessantes feitos pela natureza.

Em pedreiras localizadas em planícies o acesso é fácil, sendo feito por meio de estradas e rampas, a visibilidade do impacto ambiental é baixa, mas há possibilidade de contaminação de água subterrânea. A recuperação ambiental pode ser fácil adaptando-se o local como área de recreação, por exemplo, para a prática do *motocross*.

Com relação ao tamanho do jazimento é importante conhecer sua extensão superficial para avaliar preliminarmente a reserva do maciço rochoso, pois para que uma pedreira possa ser instalada é necessário que a mesma tenha uma vida útil (20 anos) suficiente para suprir as despesas de investimento e dar lucro ao investidor. Deve-se verificar também os tamanhos dos matacões, pois os mesmos devem ter em média volumes superiores a 100m³ devido ao grau de alteração a que normalmente essa forma de ocorrência está submetida e aos desperdícios ocasionados pelo método de extração, esquadrejamento e desbaste para a elaboração dos blocos comercializáveis.

A existência de pedreiras próximas é um fator muito positivo, já que indica um potencial real do jazimento e pode contribuir para a escolha mais adequada do tipo de lavra e tecnologia empregada para obtenção dos blocos através de uma maneira mais racional.

A exploração de uma jazida vincula-se a aceitação ao mercado dos produtos acabados. O crescimento e a retração do número de extração, o seu porte e o tipo de empreendimento estão

relacionados com a procura deste granito no mercado. As jazidas são abertas e fechadas, ampliadas ou reduzidas por determinantes mercadológicos.

Determinados tipos de granito suportam diferentes tamanhos de empreendimentos e metodologias extrativas, sendo o preço de mercado um dos fatores limitantes do método de lavra e da tecnologia empregada para o desmonte do material rochoso.

A expansão do consumo depende das condições macroeconômicas, do crescimento da renda per capita, do aumento das preferências dos consumidores pelo uso de rochas ornamentais e da redução de seus preços em relação aos materiais substitutos.

O comportamento da economia e o crescimento da renda não dependem de iniciativas do setor. No entanto, o aumento das preferências pode ser obtido através de instrumentos apropriados de divulgação e *marketing*. A redução dos preços relativos depende fundamentalmente da diminuição dos custos operacionais que, por sua vez, é função de ganhos de eficiência e produção, obtidos através de conhecimentos técnicos e aplicação de tecnologia, investimento em pesquisa e mão-de-obra especializada.

O mercado, seja ele de amplitude nacional, continental ou global, não comporta a palavra impossível. Assim, o crescimento da venda de produtos no exterior exige um projeto de longo prazo, caracterizado pela produção de materiais de elevada qualidade, pesados investimentos em *marketing*, criação de redes de distribuição e comercialização, tendo isso passado pela consolidação da imagem e reputação das empresas envolvidas na missão (Carvalho, 1998).

Por fim, determinar o tipo e a espessura do capeamento que por ventura possa existir na pedreira é um dos fatores essenciais antes de uma eventual exploração do jazimento, devido ao custo que pode acarretar sua eliminação, associados aos danos ambientais causados pela remoção do solo, vegetação e material estéril.

PESQUISA GEOLÓGICA NA EXTRAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

De posse dos conhecimentos relacionados anteriormente, a pesquisa pode desenvolver-se em seis fases. A Figura 1 mostra um esquema geral do plano de trabalho para investigação de rochas ornamentais.

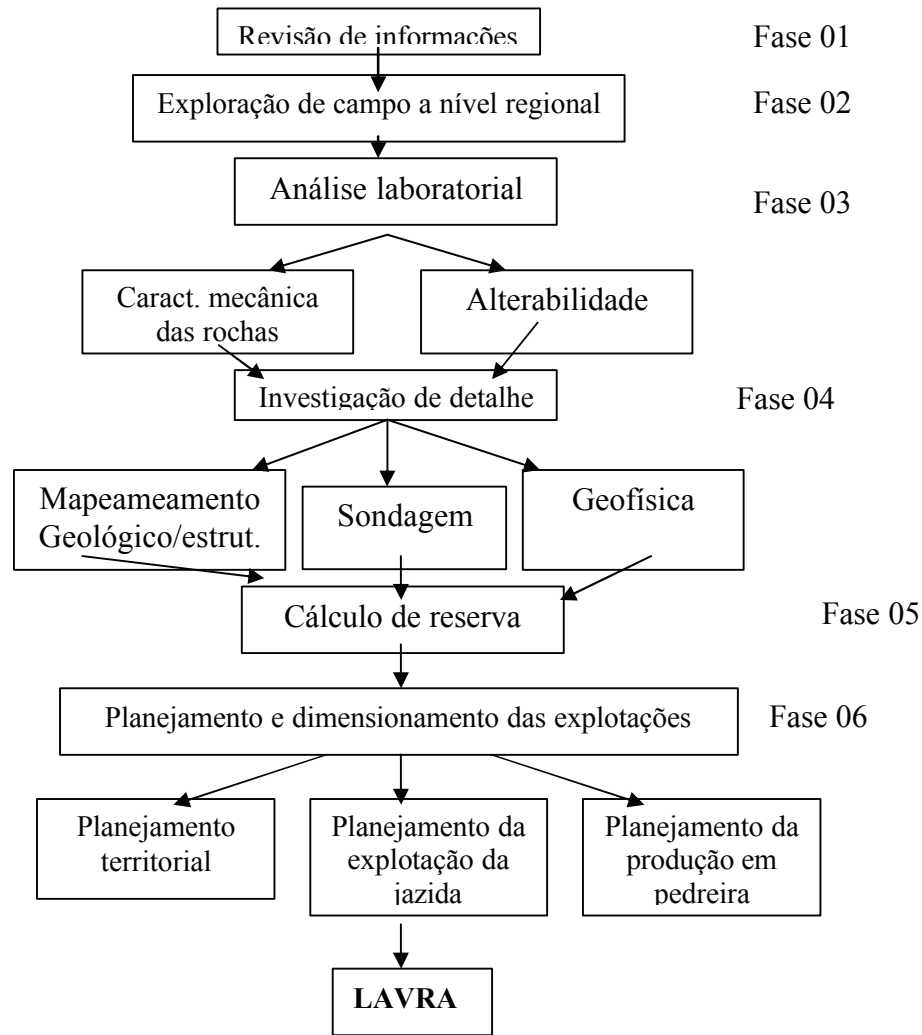


Figura 1 - Esquema geral do plano de trabalho para pesquisa de rochas ornamentais

Fase 1 – Revisão Bibliográfica

Na fase inicial de uma pesquisa, faz-se necessária uma revisão bibliográfica acerca de trabalhos desenvolvidos anteriormente, tais como teses, artigos publicados em congressos ou revistas especializadas e relatórios técnicos (dentre outros), os quais contendo informações geológicas complementares (tectônica, estratigráfica, geológica regional, etc), bem como informações básicas através de mapas geológicos e metalogenéticos, em escala regional possam permitir uma primeira seleção de zonas que tenham potencial real para um estudo detalhado que será feito posteriormente.

Fase 2 – Exploração de Campo a Nível Regional

As informações obtidas na revisão bibliográfica e o levantamento fotogeológico das áreas selecionadas conduzem à elaboração de um mapa preliminar das principais feições estruturais e litológicas, assim como identificam a cobertura de solo existente.

De posse deste estudo faz-se visitas ao campo numa escala de 1:50.000 ou 1:25.000, variando em função da rocha investigada e do tamanho da área. Nesta fase, com o auxílio do estudo fotogeológico em cada zona selecionada, procura-se descrever e analisar os seguintes aspectos:

- . Morfologia do afloramento
- . Características da rocha
- . Composição; cor; tamanho dos grãos; textura
- . Homogeneidade
- . Variação de fácies
- . Presença de descontinuidade
- . Oxidação
- . Tamanho dos afloramentos
- . Cobertura de estéril
- . Topografia; acesso e infra-estrutura industrial
- . Impacto ambiental

Todos esses dados serão condensados numa ficha de afloramento, conforme sugestão na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelo de Ficha de Afloramento

	Índice nº		
	Amostra fresca	superficial	
Localização			
Folha:			
Fotografias:			
Topografia:	Acidentada	<i>Moderada</i>	Plana
Acesso:	Difícil	Moderado	Fácil
Afloramento			
Ocorrência	Maciço	Matacão	
Extensão	Grande	Média	Pequena
Volume	Grande	Médio	Pequeno
Cobertura de solo	Grande	Média	Pequena
Cobertura vegetal	Grande	Média	Pequena
Grau de alteração	Grande	Média	Pequena
Infra-estrutura	Boa	Média	Ruim
Vulnerabilidade amb. Ocor. de pedreira próx.	Alta	Média	Baixa
Rocha			
Denominação			
Cor			
Tamanho dos grãos			
Textura			
Composição			
Descontinuidades	Xenólitos	Veios	Fraturas
Oxidação			

Fase 3 – Estudos Laboratoriais

Após a amostragem da rocha, que deve ser a mais representativa do volume a ser explotado, procede-se aos estudos sobre a qualidade da mesma através da análise de propriedades importantes, que são:

A) Alterabilidade

A determinação da alterabilidade do granito deve considerar tanto a deteriorização atual como o potencial de meteorização que pode sofrer no futuro.

A deteriorização do granito está relacionada com suas propriedades intrínsecas (composição, textura, etc) e com o meio que o rodeia, particularizado com diversos agentes externos (atmosféricos contaminantes, circulação de águas, etc).

A deteriorização atual é calculada tendo em conta o estudo petrográfico da rocha ao microscópio, analisando sua composição mineralógica, textural e microfraturas existentes. O processo de cálculo compreende vários passos intermediários e, segundo Muñoz (1989), consiste no seguinte:

Em primeira instância se calcula a alterabilidade mineralógica de cada mineral principal (x) presente no granito, caracterizando-se a cada um deles mediante a associação de um dos cinco graus ou índices apresentados na tabela de Ordaz - Esbert (Tabela 2).

Tabela 2 - Tabela de Ordaz-Esbert para determinação da deteriorização

Graus	Níveis de deteriorização de feldspato	Níveis de deteriorização de máficos	Níveis de deteriorização de quartzo
0	Não alterado aparentemente	Não alterado; São	Aparentemente São
1	Com microfissuras de ordem inferior ao tamanho do grão. Ligeira alteração secundária	Alterado somente marginalmente e ou nas linhas de exfoliação	Com microfissuras da ordem inferior ao tamanho do grão
2	Com microfissura do tamanho do grão interconexões entre as microfissuras. Alterações inferiores a 50% da superfície	Alteração marginal com pequenas manchas de alteração distribuída no grão. Microfissuras	Com microfissuras da ordem do tamanho do grão. Interconexões entre as microfissuras
3	Microfissuras abundantes. Áreas de alterabilidade superior a 50% da superfície do grão	Áreas de alteração inferior a 50% da superfície do grão microfissuras	Microfissuras abundantes e princípios de subdivisão granular
4	Microfissuras abundantes. Áreas de alteração ocupando praticamente todo o grão	Áreas de alteração superior a 50% da superfície do grão. Microfraturas abundantes	Microfissuras abundantes. Subdivisão granular

Fonte: Muñoz, p.et al (1989)

Continuando, calcula-se a deteriorização mineralógica D(x) de cada mineral mediante a formula a seguir:

$$D(x) = \frac{\sum v_i \cdot n_i}{N}$$

Sendo,

v_i = grau de alteração tomado na tabela de Ordaz- Esbert

n_i = número de grãos minerais com alteração v_i

N = número total de grãos de mineral estudado

Conhecendo D(x), calcula-se, agora, a deteriorização mineral da rocha no conjunto, ponderando a deteriorização mineralógica média de cada mineral com sua abundância relativa na rocha P(x) e dividindo por 100

$$D(m) = \frac{d(x) \cdot p(x)}{100}$$

Finalmente, para a determinação da deteriorização atual D(a), considera-se a deteriorização mineralógica já conhecida e a oxidação do granito.

Para comprovar o quanto a rocha é resistente a este tipo de alteração, preparam-se

chapas polidas representativas que são submetidas a vários ensaios ou choques térmicos segundo a norma UNE 22-197. A partir do resultado obtido o parâmetro oxidação é quantificado mediante o grau Ox que figura na Tabela 3, que varia de 0 a 4 em função da importância que representa o fenômeno na rocha.

Tabela 3 - Valor de Oxidação

Grau de oxidação Ox	Tipo de Oxidação
0	Inexistente
1	Baixa
2	Baixa a média
3	Média
4	Alta

Fonte: Muñoz, et al. (1989)

O valor D(a) se define como:

$$D(a) = \frac{dm.km + Ox.kx}{Km + kx}$$

Sendo, km e kx coeficientes de ponderação de valor 1 e 3 respectivamente. O valor qualitativo da deteriorização atual se calcula com a Tabela 4.

Tabela 4 – Valor da deteriorização atual D(a)

D(a)	Valor
0-1	Muito baixa
1-2	Baixa
2-3	Média
3-4	Alto

Fonte: Muñoz, et al. (1989)

O segundo fator que intervém na alterabilidade da rocha é o potencial da meteorização, ou alteração produzida por agentes externos ao granito que provoca a mobilidade relativa dos elementos químicos primários que os formam. Para determinar este fator é necessário realizar análise química da rocha.

Geralmente se aceita que os elementos mais móveis no transcurso da meteorização dos granitos são o Cálcio (Ca), Sódio (Na), Magnésio (Mg) e Potássio (K). Segundo Muñoz (1989) a quantificação do potencial de meteorização se realiza a partir do índice homônimo definido por Saavedra, segundo a expressão simplificada:

$$Mp(\%) = 3,28x (\% Na_2O) + 5,53 (\% MgO) + 3,76 (\% K_2O) + 5,81 (\% CaO)$$

Os valores do índice mp obtidos são expressos em porcentagem, que podem ser transformados em valores compreendidos entre 0 e 4 (índice de potencial de meteorização transformado - mpt) - Tabela 5.

Tabela 5 - Transformação do índice mp em mpt e valor do potencial de meteorização

Índice mp	Índice mpt	Valor
0 - 20	0	Muito baixa
20 - 40	1	Baixa
40 - 60	2	Média
60 - 80	3	Alta
60 - 100	4	Muito alta

Fonte: Muñoz et al. (1989)

Conhecidos D(a) e mpt, calcula-se a alterabilidade da rocha mediante a expressão:

$$|a| = \frac{D(a).ka + mpt.kp}{Ka + kp}$$

sendo ka e kp coeficientes de ponderação de valor 2 e 1 respectivamente. O valor da alterabilidade se calcula com a Tabela 6.

Tabela 6 – Valor da alterabilidade

Índice a	Valor
0-1	Muito Baixa
1-2	Baixa
2-3	Média
3-4	Alta

Fonte: Muñoz, et al. (1989)

B) Caracterização Tecnológica

As rochas ornamentais têm um valor comercial que resulta da demanda do mercado consumidor, essencialmente por motivos ligados a suas propriedades de resistência, aptidão ao corte, polimento e beleza estética.

As principais utilizações das pedras naturais se encontram no setor da construção civil, onde geralmente se destinam a ocupar funções estruturais (pilares, vigas, revestimentos, pavimentações, etc), seguidas por aplicações decorativas, ornamentais, monumentais e funerárias. As características físico-químicas que garantirão a certas rochas tais atributos resultam de sua gênese e composição mineralógica, associadas a seu passado geológico-tectônico, responsável por modificações sensíveis em termos de deformações e rupturas, umas e outras observadas pela presença de discontinuidade que condicionam seu valor econômico.

Quando as características tecnológicas das rochas não são conhecidas previamente, assim como o reconhecimento das condições ambientais às quais os revestimentos estarão sujeitos, podem surgir problemas de inadequação do material para o uso pretendido.

A caracterização tecnológica das rochas ornamentais que tem como objetivo estabelecer o uso mais adequado do material é determinada mediante dentre outros aos seguintes ensaios:

- Descrição petrográfica
- Determinação dos índices físicos
- Resistência a compressão
- Resistência a flexão
- Resistência ao impacto
- Módulo de deformação estática
- Coeficiente de dilatação térmica
- Congelamento e degelo

A análise petrográfica de uma rocha ornamental é importante para se estabelecer sua classificação petrográfica e por em evidência uma série de características, tais como existência de poros, discontinuidades, fissuras, alterações etc, que influenciam no comportamento do material na fase de utilização bem como condicionar sua evolução no transcurso do tempo.

O peso específico aparente e o coeficiente de absorção d'água se obtém a partir do mesmo ensaio e em ambos existe uma relação inversa. Para um mesmo tipo de rocha, quanto maior o peso específico aparente, menor é a porosidade e menor será o coeficiente de absorção d'água.

Uma rocha porosa absorverá mais água e seus minerais serão mais susceptíveis ao ataque pela própria água ou por outros agentes químicos. O coeficiente de absorção d'água é de suma importância quando os materiais vão ser colocados sujeitos a ação de agentes intempéricos.

A resistência a compressão de rochas é representada pela tensão capaz de provocar a sua ruptura.

Rochas que apresentam altas resistências à compressão mostram, em geral, valores adequados de outras propriedades, tais como baixa porosidade, alta resistência à flexão, etc. A resistência na direção perpendicular à estrutura da rocha é, em geral, maior que na direção paralela e maior ainda que na direção inclinada. Para um mesmo tipo petrográfico a resistência à compressão será maior para aquelas amostras de granulação menor.

O estado de alteração tem, também, grande influência na resistência à compressão, assim como o estado microfissural, sendo esta tanto maior quanto mais sã e menos microfissurada for a rocha.

O ensaio de flexão objetiva determinar a tensão que provoca a ruptura da rocha quando submetida a esforços conjuntos de compressão e tração. Esse é dos ensaios o mais importante e necessário para revestimento externos de fachadas com rochas ornamentais. O granito é duro e pouco flexível e, quando atinge sua capacidade máxima de carga, se rompe sem aviso.

Rochas de origens graníticas com granulações maiores apresentam uma tendência a uma flexão menor do que as rochas de granulação mais fina.

A resistência ao impacto (tenacidade de uma rocha) é propriedade que reflete sua coesão e indica sua maior ou menor capacidade de suportar ação mecânica instantânea (golpe ou impacto).

O valor da energia liberada pelo impacto de um corpo que provoque a ruptura de uma placa é importante para subsidiar o seu dimensionamento num revestimento, tanto de pisos como de partes baixas de um revestimento vertical.

A tenacidade depende grandemente do grau de embricamento dos cristais de minerais formadores das rochas, assim, como da sua estrutura.

O módulo de deformação estática é a relação entre as tensões e as deformações sofridas pela rocha. Frazão & Farjallat (1995) determinam o módulo de deformação estática sob compressão uniaxial, no qual se promove o carregamento de corpos-de-prova prismáticos, cilíndricos ou retangulares, até cerca de 50 a 75% da tensão que causaria a ruptura da rocha, enquanto se mede a deformação do corpo-de-prova com instrumentos apropriados.

O coeficiente de dilatação térmica linear é para medir o aumento de volume quando submetida a variações de temperatura, podendo dilatar-se ou contrair-se conforme a temperatura aumente ou diminua. Seu conhecimento resulta de grande importância na hora de prever juntas de dilatação quando o material vai ser utilizado no exterior ou em lugares com grande variações de temperatura.

O ciclo de congelamento e degelo é um fenômeno comum nos países do hemisfério norte. A água acumulada nos poros das rochas aumenta de volume quando sob temperatura negativa, é solicitada intensamente nas pedras em revestimento de fachadas e pisos, levando-as a um enfraquecimento progressivo.

Ciclos de tensão gerada pela expansão do gelo, seguida da distensão pelo degelo, promovem paulatinamente a queda da resistência das pedras ou até a sua completa desagregação. O enfraquecimento se deve às tensões advindas da expansão resultante do congelamento da água e o efeito será tanto maior quanto maior for a porosidade intercomunicante, quanto menores forem os poros e quanto maior for o seu grau de saturação.

Todos esses ensaios são executados no mundo todo através de procedimentos padronizados por instituições normalizadoras, entre as quais se destacam: American Society for Testing and Material-ASM; Deutches Institut Fur Normung- DIN; Association Française du Normalisation- AFNOR; Internacionalle Italiano de Unificazion- UNI e anorma espanhola UNE, no Brasil ABNT.

Fase 4 – Pesquisa de Detalhe

As áreas selecionadas nas fases anteriores serão investigadas detalhadamente visando quantificar e qualificar os materiais, fornecendo subsídios para a elaboração de um plano de lavra onde a tecnologia empregada e os equipamentos a serem utilizados sejam os mais adequados com as condições geológicas/estruturais e com a morfologia da área.

Inicialmente deve-se fazer um levantamento planialtimétrico preciso que contenha toda a morfologia do corpo rochoso onde se pretende lavrar em escala pequena da ordem de 1:500, com equidistância de curvas de nível da ordem máxima tolerável de 1 a 5 metros.

Posteriormente, faz-se um mapeamento geológico/estrutural na escala 1:500 ou 1:10000 visando obter informações detalhadas acerca das características texturais e mineralógicas da rocha, existência de veios, manchas, lentes, xenólitos, nódulos de oxidação etc., assim como todas as estruturas que afetam a rocha tais como falhas, juntas ou diáclases, dobras, diques, conhecendo-se a fundo seu comportamento espacial. Essas feições podem determinar perda na lavra e menor dimensão dos blocos lavráveis, bem como acarretar problemas de resistência físico-mecânica em chapas.

Concentração de minerais máficos (sobretudo biotita grosseira) e sulfetos geram problemas de polimento nas chapas e alterabilidade mais acentuada nos produtos aplicados.

Nódulos, enclaves, pequenos diques e veios, sobretudo em rochas homogêneas, determinam problemas de padrão estético e perdas no esquadramento de chapas. Texturas porfiróides ou grosseiras desaconselham o uso da rocha para lajotas de pequena espessura, por questões de resistência mecânica.

Em virtude da Anisotropia e da heterogeneidade das propriedades que os maciços apresentam, como consequência da presença de descontinuidades, sua caracterização deve englobar informações sobre altitude, espaçamento e persistência assim como localização e inclinação das fraturas porque delas dependem a melhor orientação para os trabalhos de exploração em pedreiras.

As espécies de acidentes estruturais que ocorrem no maciço rochoso são foliações, dobramentos e fraturas.

As foliações constituem o tipo mais simples de estrutura anisotrópica, estando formadas por superfícies paralelas de menor resistência que separam volumes individualizados de material rochoso e correspondem a orientações preferenciais dos minerais que constituem a rocha.

Os dobramentos são estruturas comuns a pequena profundidade resultantes da predominância de tensões horizontais elevadas na crosta, provocando deformações importantes na vertical, e na maioria dos casos mantendo a forma inicial do maciço estratificado.

As fraturas naturais ocasionadas por tensões impostas pela tectônica e durante os movimentos da crosta terrestre, além dos fenômenos de contração térmica das rochas ígneas, se dividem no maciço rochoso em duas categorias: as juntas, quando ao longo delas ocorrem deslocamentos muito pequenos ou nulos; e as falhas, onde ocorre deslocamento de forma significativa.

O estudo das fraturas naturais é hoje um vasto campo de investigação, não só para promover a extração de fluidos do maciço (água subterrânea, petróleo e gás) mas também para a exploração de pedras naturais.

Os tipos mais comuns de juntas são a de tração, com orientação perpendicular aos planos de estratificação e geralmente associadas às zonas de máxima curvatura dos dobramentos, seguidos por juntas de rotação, devido à interação entre capas durante os dobramentos. Também aparecem juntas paralelas às capas das rochas estratificadas quando as cargas verticais de compressão são suficientes para criar planos de ruptura por corte durante os episódios de dobramento. Finalmente, tem-se a existência de juntas de contração associadas ao esfriamento dos magmas, são superficiais de menor resistência dos maciços de rochas ornamentais.

As falhas são fraturas causadas por movimentos ao longo de planos de corte, geralmente de grande amplitude. Sua gênese está na dependência dos estudos de tensões verificadas na zona de falha, influenciando especialmente na relação entre os componentes horizontais e verticais desses estados de tensões. Os três tipos básicos de falha são as normais ou de gravidade, que se produzem a pequena profundidade, as inversas a grande profundidade e as direcionais ou transcorrentes quando os componentes horizontais dos estados de tensões assim o determinam.

Os fraturamentos é um fator importante na explotabilidade dos jazimentos, já que de sua densidade e o tipo de diáclase dependerá a possibilidade de extração de blocos comerciais. Daí, a necessidade de se estudar o fenômeno em detalhe.

Em primeiro lugar é preciso conhecer a distribuição espacial do sistema de fraturas com a finalidade de detectar as direções de debilidade preferencial. As famílias de fraturas observadas através dos reconhecimentos de campo podem ser visualizadas mediante diagramas, que se elaboram a partir do número relativo (frequência) de fraturas que existem em cada direção.

O estudo das fraturas nos afloramentos deve concentrar-se na identificação da geometria e distância das diferentes famílias de diáclases que podem existir. Para isso é conveniente utilizar a projeção esteriográfica, pois tem demonstrado ser uma ferramenta muito apropriada para o manejo e tratamento dos dados angulares (direção e mergulho) que caracterizam a identificação destas descontinuidades.

Conhecida a forma das famílias de diáclases existentes, é preciso estudar sua continuidade ou desenvolvimento, tanto em superfície como em profundidade. Para isso é interessante a realização de furos de sondagem ou o emprego de técnicas geofísicas já que, por meio de uma adequada malha de sondagens elétricas verticais, é possível estabelecer tanto o grau de fraturamento do maciço como a espessura do recobrimento e, dentro de certos limites, a continuidade em profundidade da rocha investigada.

Baseado no estudo detalhado das informações de superfície se projeta furos de sondagens com inclinações adequadas ao padrão geológico/estrutural encontrado com profundidades que podem variar de 20 a 40m. Estes furos deverão ser amarrados topograficamente e nivelados. Os furos de sondagem não devem ser inferiores a três, já que são necessárias informações tridimensionais para o planejamento de lavra. A sondagem auxiliará tanto na definição de reservas medidas quanto para observações de aspectos estruturais e estéticos.

O uso de barriletes deve ter diâmetro em torno de 10 cm, a fim de obter-se um testemunho menos sujeito a quebras mecânicas derivadas da vibração e/ou impactos da sonda.

A descrição dos testemunhos deve ser feita numa escala de centímetros, amostrando-se todos os fatores geológicos-estruturais do tipo de rocha com perfeita capacidade de distinção dos fraturamentos naturais provocados pela operação de sonda. É importante ter perfeita caracterização dos ângulos referentes a acamamento, xistosidade e toda e qualquer estrutura que deve ser correlacionada com os dados de superfície obtidos no mapeamento geológico.

Os testemunhos de sondagem podem ter corte longitudinal e polidos, ilustrando assim seções verticais ou horizontais da porção explotável do maciço.

O uso de técnicas geofísicas, ciência que trata dos fenômenos físicos que se produzem na terra baseadas nos métodos sísmicos, geralmente aplicados na pesquisa petrolífera e mineral, também pode ser de grande valia no setor de rochas ornamentais.

As técnicas geofísicas são aplicáveis em estudos preliminares de maciços, bancadas e matacões para detecção de fraturamentos, definição de espessura de capeamento e verificação da geometria de corpos subjacentes, como por exemplo matacões soterrados.

Um corpo sólido como uma rocha pode transmitir em seu interior ondas elásticas, que podem ser geradas por detonação, impactos mecânicos ou vibrações. Existem dois tipos principais de ondas elásticas: a onda longitudinal (p) e a onda transversal (s). Na propagação das ondas (p) as partículas do meio vibram na direção desta propagação, enquanto que nas ondas (s) a vibração das partículas ocorre na direção perpendicular à da propagação.

Os métodos sísmicos de sondagem geofísica baseiam-se no comportamento das ondas (p) e (s), sendo que a onda (p) é mais utilizada na análise sísmica. São portanto, aplicadas mediante a produção, transmissão e detecção destas ondas elásticas. A detecção é feita através de geofones ou sensores.

Pelo estudo dos tempos de chegada em um certo número de pontos escolhidos, é possível deduzir as posições das diferentes interfaces de contato onde as ondas se refletem, refratam ou são

amortecidas por mulas (xenólitos), barbantes (veios), área de fraturamentos, dentre outros.

Nas rochas graníticas a velocidade de propagação das ondas (p) fica entre 5.000m/s e 6.000m/s. Se for material perfeitamente homogêneo e sem fraturas essa velocidade é obtida e pode se manter constante em todas as medidas. No caso de material com heterogeneidades do tipo diferenciação mineralógica, enclaves, veios, dentre outros sem presença de fraturas, são observadas variações máximas de 14% na velocidade de propagação das ondas (p).

Por outro lado, quando uma frente de onda intercepta uma fratura, sua trajetória sofre um desvio significativo, que acarreta um retardamento da ordem de 30% a 40% na recepção. Esse atraso de chegada é então interpretado como uma quebra de velocidade, que indica a presença de fraturas.

O emprego da Geofísica na pesquisa de rochas ornamentais, anteriormente descrito, é de suma importância na definição da abertura ou não da pedreira, além de contribuir no direcionamento das frentes de lavra, minimizando os impactos causados ao meio ambiente, reduz o volume de rejeitos, obtendo-se desta forma, blocos de boa qualidade nos quais não se verificam fraturas, veios, xenólitos, nem variações texturais da rocha. Conhecendo-se melhor as características lito-estrutural das rochas através da Geofísica pode-se definir a tecnologia de lavra que será mais adequada a tais características, evitando desta forma danos à rocha.

Esses estudos mencionados visam prever o índice de recuperação, as dimensões básicas e as formas dos blocos a serem extraídos e auxiliar no cálculo de reserva da área, além de fornecer material de qualidade.

Tem-se verificado ser muito difícil para compradores, vendedores e produtores de blocos garantir o padrão comercializado através de uma amostra polida, em razão da evidente falta de representatividade desse tipo de amostra em relação ao universo de blocos produzidos. Muitas são as circunstâncias a que se submetem os blocos durante a extração. Essas possuem características geológicas e extrativas de tal modo variáveis que muitas vezes fogem ao controle de quem consome ou, até mesmo, de quem produz.

A pesquisa geológica ajuda a obter produtos de qualidade os quais deverão conter dentre outros os seguintes atributos:

- Estrutura interna sadia
- Dimensões corretas e padronizadas
- Aspecto ornamental constante e padronizado
- Garantia de fornecimento
- Preço competitivo

Fase 5 – Cálculo de Reservas

Uma vez determinada a natureza e distribuição dos mananciais existentes no jazimentos deve-se passar à etapa de cálculo do volume das reservas exploradas.

A tonelagem da reserva se estima multiplicando o volume da reserva cubada pela densidade média do material.

O cálculo de reserva pode ser feito, dentre outros, pelos seguintes métodos:

A) Método das Seções Transversais

Seções geológicas verticais são distribuídas a intervalos regulares para representar a forma e área do corpo rochoso em cada seção. A reserva é calculada pelo somatório da área em cada seção pela equidistância entre estas:

$$V_t = \sum A_i \cdot L_i$$

Onde:

V_t = Volume total de material (m^3)

A_i = Área do depósito na seção S_i (m^2)

L_i = Espessura do material representado na seção S_i (m)

B) Método das Isolinhas

O depósito se transforma num corpo de volume similar apoiado sobre um plano horizontal. O número de isolinhas é definido de acordo com o grau de complexidade do depósito.

O volume é calculado pela fórmula:

$$V = h \left(\frac{A_0 + A_1 + A_2 + \dots + A_n + A_{n+1}}{3} + N_a \right) \pm \frac{1}{3} A_n h_x$$

Onde:

A_1 = Área do depósito entre isolinhas (m^2)

H = Distância entre isolinhas (m)

$\pm h_x$ = Volume remanescente (+ pico – depressão + $h/2$)

C) Método da Triangulação

Se baseia em unir as sondagens dos dados pontuais mediante retas formando uma malha triangular. Cada triângulo é a base de um prisma imaginário com uma potência determinada. Os dados do prisma são média aritmética ou ponderada para as potências de cada uma das três sondagens.

D) Método dos Polígonos

Divide-se o jazimento em polígonos determinados pelas mediatrizes dos segmentos que unem as sondagens, dentro dos quais o potencial dado por cada sondagem se mantém supostamente constante. O volume se calcula multiplicando a área do polígono pela espessura da sondagem.

E) Método dos Prismas Regulares

O depósito é dividido em planta segundo uma malha regular, passando a ser constituído por prisma retos de seção regular cujo volume é dado multiplicando-se a altura de cada um pela área de seção.

Fase 6 – Planejamento das Explorações

A falta de um planejamento ordenado e coordenado das gestões na atividade extrativa tem sido bastante freqüente no setor de rochas ornamentais.

Para o sucesso do empreendimento deve-se planejar suas atividades de tal forma que responda as distintas exigências, tanto econômicas-produtivas como ambientais-sociais.

Em função dos objetivos e do grau de investigação, podem-se identificar três níveis no processo planificador:

A) Planejamento territorial

B) Planejamento da exploração de uma jazida

C) Planejamento da produção de uma pedra

O planejamento territorial em grande escala trata da viabilidade das atividades extrativas, e para tanto se identifica os jazimentos destinados a exploração e se ditam disposições para sua gestão. Criar condições necessárias para utilização ordenada e coordenada do território, levando em conta as exigências impostas pelo desenvolvimento e a melhoria de qualidade de vida, tudo respeitando o meio ambiente.

O planejamento da exploração de uma jazida identifica as áreas, os volumes cubados e as seções espaço-temporal da exploração, coordenando as atividades de infra-estrutura de serviço (pistas, rampas, praças, etc), dos rejeitos e a recuperação dos terrenos.

O planejamento dos trabalhos de pedreiras define, no âmbito da exploração, a disposição, as dimensões e a coordenação das atividades operacionais, a seqüência espaço-temporal de sua execução e os recursos produtivos a serem utilizados.

De posse desses estudos procede-se à abertura da frente de lavra, utilizando o método e a tecnologia que mais se adequou com o resultado da pesquisa realizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRES, B. L. A. **Alteração e alterabilidade de rochas**. Lisboa: Instituto de Investigação Científica, 1991, 384.

BORTOLUSSI, A. Escavazione e preparazione du blocchi di granite, Carrara. In: **Marmi Graniti, PIETRE**. v. 29, n. 162, p. 51-52, 1988.

- CARANASSIOS, A.; CICCUI, R. Tecnologia de extração e valorização das rochas ornamentais. **Rocha de Qualidade**, São Paulo, v. 109, p. 58-81, abr./jun. 1992.
- CARUSO, L. G. **Os mármore e granitos brasileiros: seu uso e suas características e tecnologias.** **Rochas de Qualidade**, São Paulo, v. 47, p. 36-45, 1978.
- CHIOD FILHO, C.; ONO, P. A. Tipos de lavra e técnicas de corte para desmonte de blocos. **Rocha de Qualidade**, São Paulo v. 120, p. 93-106, 1995.
- CICCUI, R. Moderne tecniche di estrazione dei lapidei ornamentali i problemi di impatto ambientali in Italy. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE CONTROLE AMBIENTAL E SEGURANÇA EM MINERAÇÃO, São Paulo. **Anais**, São Paulo: EPUSP, 1989. p. 55-65.
- CRESPINO, Antônio. Novas tecnologias para extração de rochas ornamentais. **Rocha de Qualidade**. v. 110, p. 95-100, [19--].
- DA GAMA, Carlos. Dinis. **Aspectos geotectônicos y de fracturación de las rocas ornamentales.** Madrid: s. n., 1996. p. 231-263, 1996.
- DUARTE, Giovanni W. Método de lavra determina a eficácia do revestimento. **Rocha de Qualidade**. v. 138, p. 91-110, 1998.
- FIGUEIREDO, Paula M. dos S. L. do R. **Estudo tecnológico de rochas calcárias da região de Lisboa (Jurássico e Cretáceo).** 1997. 1979 f. Tese (Doutorado) Universidade Técnica de Lisboa, 1997.
- FRAZÃO, E. B.; FRAJALLAT, J. E. S. Características tecnológicas das principais rochas silicáticas brasileiras usadas como pedras de revestimento. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA PEDRA, 1., 1995, Lisboa. Lisboa: s. n., 1995. Não paginado.
- LOPEZ, E. J. Control, evaluacion e impacto ambiental. In: _____ **Manual de rocas ornamentales.** Madrid: s. n., 1996, cap. 20. p. 445-492.
- MELO, Evenildo B. **Pesquisa mineral de rochas ornamentais.** In: SEMINÁRIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 1., 1998, Olinda, Pe: s. n., 1998. Não paginado.