

UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS TECNOLÓGICOS COMO AUXÍLIO NA INTERPRETAÇÃO DO POLIMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Jefferson Luiz CAMARGO¹, Antonio Carlos ARTUR², Leonardo Luiz Lyrio da SILVEIRA³

(1) Pós-graduação em Geologia Regional, Instituto de Geociências e Ciências Exatas/IGCE, Universidade Estadual Paulista/UNESP - Campus de Rio Claro. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: jcamargo@cetem.gov.br.

(2) Departamento de Petrologia e Metalogenia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas/IGCE, Universidade Estadual Paulista/UNESP - Campus de Rio Claro-SP. Avenida 24-A, 1515 – Bela Vista. Caixa Postal 178. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: acartur@rc.unesp.br.

(3) Centro de Tecnologia Mineral, CETEM, Rodovia Cachoeiro Alegre, Km 05, Bloco 10, Fazenda Morro Grande, CEP 29300-970. Cachoeiro de Itapemirim-ES. Endereço eletrônico: leolysil@yahoo.com.br.

Introdução

Polimento de rochas ornamentais

Materiais e métodos

Apresentação e discussão dos resultados

Análise petrográfica

Caracterização tecnológica

Densidade Aparente, Porosidade Aparente e Absorção de Água (Índices Físicos)

Propagação de Ondas Ultrassônicas Longitudinais (Vp)

Resistência à Compressão Uniaxial

Coefficiente de Dilatação Térmica Linear

Resistência ao Desgaste Abrasivo Amsler

Resistência à Abrasão Profunda

Microdureza *Knoop*

Síntese dos resultados tribológicos de polimento

Considerações finais

Agradecimentos

Referências bibliográficas

RESUMO - O polimento é o principal tipo de acabamento realizado em chapas e ladrilhos de rochas, sendo este realizado pelo atrito gerado no movimento rotacional de elementos abrasivos dispostos em cabeçotes, denominados satélites, sob pressão contra a superfície da rocha. A rocha é um elemento ativo no processo, portanto o conhecimento das propriedades tecnológicas da mesma pode contribuir para melhorar o entendimento desta importante etapa de beneficiamento. Para realização deste trabalho foram selecionados três litotipos rochosos com aspectos petrográficos, texturais e estruturais distintos, justamente para comparar os resultados de caracterização tecnológica e tentar relacionar quais características intrínsecas mais influenciaram na ação de desgaste, subsidiando informações para interpretação do processo de polimento. Os materiais escolhidos foram um charnockito, um monzogranito e um gnaiss inalterados, denominados comercialmente como Verde Labrador, Cinza Castelo e Preto Indiano, respectivamente. Notou-se que dentre os ensaios físicos e mecânicos realizados, os resultados de resistência à compressão uniaxial, densidade aparente, absorção de água, coeficiente de dilatação térmica linear e a propagação de ondas longitudinais não mostram correlações diretas com os resultados experimentais de polimento. Por outro lado, a porosidade aparente, os resultados de ensaios de resistência ao desgaste abrasivo e dureza *knoop* mostram correlações diretas com a do polimento das rochas.

Palavras-Chave: rocha ornamental, caracterização tecnológica, polimento, Tribologia

ABSTRACT - The polishment is the main type of finishing performed in slabs and tiles of rocks, which is done by the friction generated in the rotational motion of abrasive elements disposed in polishing heads, under pressure, against the rock surface. The rock is an active element in the process, therefore the knowledge of its properties, can contribute to improving the understanding of this important stage of processing. Three petrographic types of rocks with distinct textural and structural, were selected for this study, in order to compare the results of characterization tests and try to relate intrinsic characteristics which most influenced the action of wear, supporting information for interpretation of the polishing process. The chosen materials were charnockite, monzogranite and gneiss, known commercially Verde Labrador, Cinza Castelo and Preto Indiano. Among the mechanical-physical tests, the results of the uniaxial compression strength, density, water absorption, coefficient of linear thermal expansion and propagation of longitudinal waves show no direct correlation with experimental results of polishing. On the other hand, the porosity, wear resistance and *knoop* hardness show apparent direct correlation with the rock polishing.

Keywords: characterization tests, polishing, dimension stone, tribology.

INTRODUÇÃO

As rochas ornamentais, do ponto de vista comercial, são subdivididas basicamente em mármore e granitos, numa designação mais ampla do que na terminologia petrológica tradicional. Os granitos abrangem, genericamente, as rochas silicáticas (granitos,

sienitos, charnockitos, gabros, basaltos, dioritos, pegmatitos, gnaisses, migmatitos, granulitos, etc.), enquanto os mármore englobam as rochas carbonáticas (calcários, essencialmente calcíticos, e dolomitos, essencialmente dolomíticos). Alguns outros

tipos litológicos, incluídos também no campo das rochas ornamentais são os quartzitos, arenitos, serpentinitos, ardósias e basalto, também muito importantes setorialmente (Brandão et al., 1991; Petrakis et al., 2010).

Meyer (2003) destaca que o padrão textural e estrutural classificam os materiais rochosos em dois grupos: os homogêneos e os movimentados. Os granitos homogêneos caracterizam-se por possuírem estruturas isotrópicas, sem orientação mineral definida, enquanto os granitos movimentados correspondem aos gnaisses e migmatitos que apresentam algum tipo de estrutura ou textura definida pela concentração ou orientação preferencial de seus constituintes minerais, resultando em estruturas migmatíticas, bandamento e foliação.

Segundo Frazão & Paraguassú (1998) as rochas como elementos duráveis e decorativos incluem a função de manter aspectos estéticos ao longo do tempo, proteger a estrutura do intemperismo, promover o isolamento térmico na edificação e também facilitar a limpeza, assim como manter a higiene no ambiente.

Dentre os tipos de acabamento superficial de rochas ornamentais o processo de polimento é o mais comum. No que diz respeito à qualidade do polimento, Kaschner (1996) descreve que a intensidade do brilho que uma placa de rocha apresenta é função das propriedades refletivas dos minerais que compõem a rocha, sendo também inversamente proporcional à rugosidade da superfície. Logo, o brilho e o lustro de uma rocha ornamental são obtidos pela eliminação destas rugosidades herdadas na etapa de serragem e pelo “fechamento dos poros” entre os diferentes minerais que formam a rocha. Isto se dá pela ação de elementos abrasivos que, conduzidos em movimentos de atrito sobre o material, vão desbastando-o até atingir o grau de polimento desejado através do uso de abrasivos com granulometrias decrescentes.

O processo de polimento está inserido no contexto tribológico com o desgaste do tipo abrasivo a dois corpos (rebolo abrasivo e rocha), sendo que o terceiro elemento formador

do sistema é a máquina de polir e suas variáveis operacionais. Portanto, é de grande importância o conhecimento dos mecanismos de atrito e desgaste. As características intrínsecas dos materiais rochosos (composição mineralógica, sanidade, textura e estrutura) são muito importantes para compreensão do processo de desgaste, pois a rocha é um elemento ativo no processo (Silveira, 2007).

A rocha ornamental para fins de revestimento é obtida por meio de vários processos, no qual se inicia na exploração, transporte e os beneficiamentos primário e secundário. Ao longo dessas etapas as rochas são submetidas a solicitações, como, por exemplo, atrito, impacto, compressão e flexão. Quando aplicadas como materiais de revestimento podem também ser expostas a ataques por produtos de limpeza, ações de intempéries (chuvas e vento) ou outros líquidos agressivos. O conhecimento das propriedades tecnológicas pode contribuir tanto para melhorar o entendimento das etapas de exploração e beneficiamento quanto subsidiar uma indicação mais segura de uso, de modo que as características físico-mecânicas e estéticas se mantenham preservadas o maior tempo possível.

A caracterização tecnológica de rochas ornamentais é realizada por meio de ensaios e análises, cujo principal objetivo é a obtenção de parâmetros petrográficos, químicos, físicos e mecânicos do material que permitam a qualificação da rocha para uso no revestimento de edificações (Frasca, 2003).

Interpretações sobre a influência das propriedades petrográficas no comportamento físico-mecânico das rochas já foram aplicadas e discutidas por Rodrigues et al. (1996; 1997), Navarro (1998; 2002; 2006), Tuğrul & Zarif (1999), Navarro & Artur (2001; 2002), Mesquita (2002), Frasca (2003), Meyer (2003), Lima et al. (2010), Pazeto (2011), entre outros.

Neste trabalho o objetivo foi realizar ensaios de caracterização tecnológica em rochas sãs com intuito de auxiliar na interpretação do processo de polimento de rochas ornamentais.

POLIMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

O polimento tem como função principal conferir brilho, além de dar um fechamento

maior dos poros e com isso diminuir a infiltração de água, evitando assim a alteração da rocha por hidrólise. É realizado pelo atrito gerado no movimento rotacional de elementos abrasivos dispostos em cabeçotes, denominados satélites, sob pressão, contra a superfície da rocha, sendo este movimento atritante constantemente refrigerado com água em abundância. As sequências granulométricas são definidas por abrasivos mais grossos para o levigamento e cada vez mais finos para o polimento e lustro final, onde cada granulometria visa retirar as irregularidades deixadas pela etapa antecessora.

Na fase de polimento, fatores como a composição mineralógica, o teor e as dimensões dos grãos de quartzo, a estrutura e cor da rocha controlam a manutenção ou a perda do lustro (Artur et al., 2002).

De acordo com Silveira (2007) o

beneficiamento de rochas ornamentais pode ser analisado sobre a ótica da Tribologia, pois compreende uma sucessão de etapas de desgaste abrasivo, que se inicia com a serragem dos blocos e vai até o polimento final das placas. Tal processo industrial configura um tribossistema, onde as propriedades intrínsecas da rocha, do abrasivo e das variáveis operacionais são elementos ativos no processo. Entre as principais variáveis existentes no tribossistema de polimento das rochas ornamentais, pode-se citar:

- **rocha:** mineralogia, textura, estrutura, porosidade, granulação, grau de microfissuramento, grau de alteração;
- **abrasivo:** dureza, composição do ligante, forma, tamanho e tipo do elemento abrasivo;
- **processo:** tipo de equipamento, velocidade de avanço, pressão aplicada, fluxo de água, velocidade de corte e tipo de movimento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram selecionados três litotipos rochosos inalterados com aspectos petrográficos, texturais e estruturais distintos, justamente para comparar os resultados obtidos e tentar relacionar quais características intrínsecas mais influenciaram na ação de desgaste.

Os materiais escolhidos foram um charnockito, um monzogranito e um gnaiss, denominados comercialmente como Verde Labrador, Cinza Castelo e Preto Indiano, respectivamente (Figura 1).

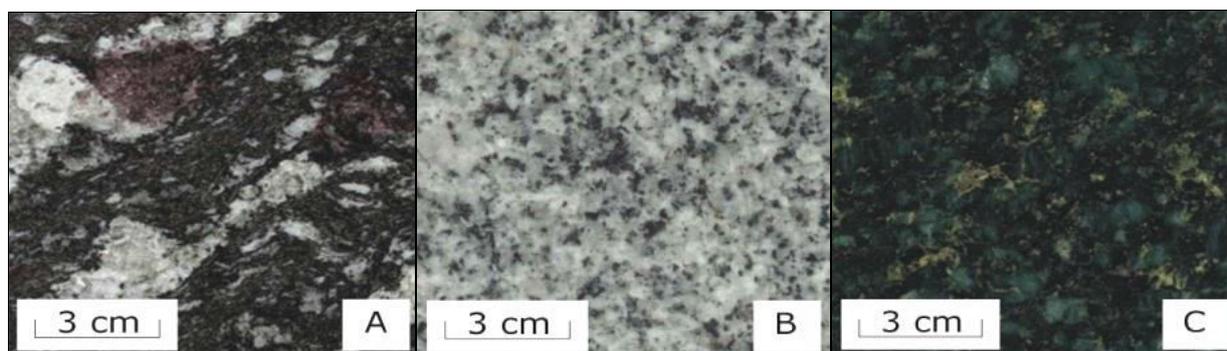


Figura 1. Rochas utilizadas na pesquisa: (A) gnaiss Preto Indiano, (B) monzogranito Cinza Castelo, (C) charnockito Verde Labrador.

As rochas foram submetidas aos seguintes ensaios de caracterização tecnológica: análise petrográfica; determinações da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água, correspondentes aos Índices Físicos; coeficiente de dilatação térmica linear; resistência à compressão uniaxial; desgaste abrasivo Amsler; microdureza *Knoop*; abrasão profunda e propagação de ondas ultrassônicas longitudinais. Os ensaios foram realizados nos

Laboratórios de Rochas Ornamentais do CETEM com sede localizada no Rio de Janeiro e no Núcleo Regional do Espírito Santo (NUCI) em Cachoeiro de Itapemirim, no Laboratório de Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais do IFES de Cachoeiro de Itapemirim, no Laboratório de Rochas Ornamentais do DPM/IGCE/UNESP - campus Rio Claro, no Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT e no Laboratório de

Revestimentos Cerâmicos da Escola SENAI “Mario Amato” de São Bernardo do Campo, obedecendo diretrizes estabelecidas pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT, da American Society for Testing and Materials-ASTM e European Commission for Normalization-EN.

Para realização dos testes de polimento das rochas citadas foi utilizado uma politriz semi-automática de um cabeçote de propriedade do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - IFES, *Campus* de Cachoeiro de Itapemirim (Figura 2).



Figura 2. Politriz semi-automática utilizada para realização dos experimentos.

Os abrasivos utilizados foram do tipo magnesianos. A escolha do uso se deu pela possibilidade de se conseguir mensurar o desgaste abrasivo em pouco tempo, visto que a perda de massa em abrasivos resinóides e diamantado é mais baixa. A sequência abrasiva

(em *mesh*) utilizada foi: 24, 36, 60, 120, 220, 400, 600, 800, 1200 e lustro (Figura 3). Tal sequência já foi utilizada em estudos anteriores sobre polimento e também é utilizada nas indústrias.

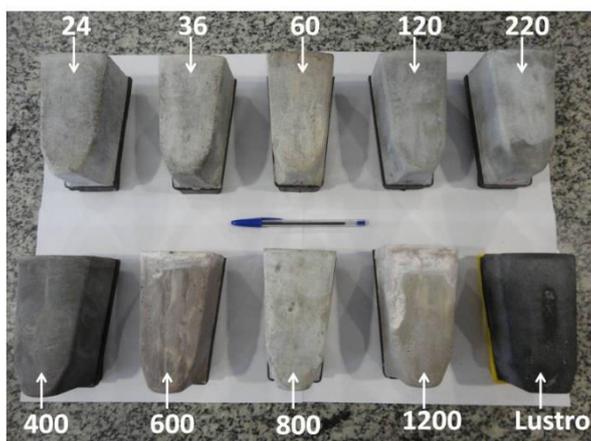


Figura 3. Sequência dos rebolos abrasivos magnesianos.

Algumas calibrações foram necessárias para definir as variáveis a serem testadas na etapa experimental de polimento (Figura 4). Foram definidas 24 situações operacionais distintas, variando a pressão de carregamento (1 e 2kgf/cm²), a velocidade de rotação de satélite (300, 400, 500 e 600 rpm) e a exposição do

satélite sobre a rocha (1, 2 e 3), sendo a exposição 1 correspondente ao percurso completo (ida e volta) do satélite no sentido da largura da chapa, realizando apenas uma faixa de desgaste (diâmetro do cabeçote) por ciclo de polimento, a exposição 2 se refere a duas vezes o percurso citado e a exposição 3 a três vezes.



Figura 4. Procedimento de calibração das pressões de carregamento.

Após as calibrações foi definida uma sistemática, adotando uma nomenclatura correspondente para cada etapa (Figura 5). Na

Figura 6 é mostrado exemplo de uma tabela confeccionada para etapa experimental do charnockito Verde Labrador.



Legenda: VL - rocha Verde Labrador; Velocidade de rotação do satélite em rpm (1=300; 2=400; 3=500; 4=600rpm); Pressão de carregamento do satélite em kgf/cm² (A=1; B=2 kgf/cm²); Exposição do satélite sobre a rocha (percursos 1; 2; 3); Abrasivos (mesh): 24; 36; 60; 120; 220; 400; 600; 800; 1200 e Lustró.

Figura 5. Nomenclatura de uma etapa de teste no charnockito Verde Labrador.

ABRASIVOS (MESH)	#24	VL 1 A 1 24	VL 4 A 1 24	VL 3 B 1 24	VL 2 A 2 24	VL 1 A 3 24	VL 4 A 3 24	VL 3 B 2 24	VL 2 B 3 24
	#36	VL 1 A 1 36	VL 4 A 1 36	VL 3 B 1 36	VL 2 A 2 36	VL 1 A 3 36	VL 4 A 3 36	VL 3 B 2 36	VL 2 B 3 36
	#60	VL 1 A 1 60	VL 4 A 1 60	VL 3 B 1 60	VL 2 A 2 60	VL 1 A 3 60	VL 4 A 3 60	VL 3 B 2 60	VL 2 B 3 60
	#120	VL 1 A 1 120	VL 4 A 1 120	VL 3 B 1 120	VL 2 A 2 120	VL 1 A 3 120	VL 4 A 3 120	VL 3 B 2 120	VL 2 B 3 120
	#220	VL 1 A 1 220	VL 4 A 1 220	VL 3 B 1 220	VL 2 A 2 220	VL 1 A 3 220	VL 4 A 3 220	VL 3 B 2 220	VL 2 B 3 220
	#400	VL 1 A 1 400	VL 4 A 1 400	VL 3 B 1 400	VL 2 A 2 400	VL 1 A 3 400	VL 4 A 3 400	VL 3 B 2 400	VL 2 B 3 400
	#600	VL 1 A 1 600	VL 4 A 1 600	VL 3 B 1 600	VL 2 A 2 600	VL 1 A 3 600	VL 4 A 3 600	VL 3 B 2 600	VL 2 B 3 600
	#800	VL 1 A 1 800	VL 4 A 1 800	VL 3 B 1 800	VL 2 A 2 800	VL 1 A 3 800	VL 4 A 3 800	VL 3 B 2 800	VL 2 B 3 800
	#1200	VL 1 A 1 1200	VL 4 A 1 1200	VL 3 B 1 1200	VL 2 A 2 1200	VL 1 A 3 1200	VL 4 A 3 1200	VL 3 B 2 1200	VL 2 B 3 1200
	Lustró	VL 1 A 1 Lustró	VL 4 A 1 Lustró	VL 3 B 1 Lustró	VL 2 A 2 Lustró	VL 1 A 3 Lustró	VL 4 A 3 Lustró	VL 3 B 2 Lustró	VL 2 B 3 Lustró
	#24	VL 2 A 1 24	VL 1 B 1 24	VL 4 B 1 24	VL 3 A 2 24	VL 2 A 3 24	VL 1 B 2 24	VL 4 B 2 24	VL 3 B 3 24
	#36	VL 2 A 1 36	VL 1 B 1 36	VL 4 B 1 36	VL 3 A 2 36	VL 2 A 3 36	VL 1 B 2 36	VL 4 B 2 36	VL 3 B 3 36
	#60	VL 2 A 1 60	VL 1 B 1 60	VL 4 B 1 60	VL 3 A 2 60	VL 2 A 3 60	VL 1 B 2 60	VL 4 B 2 60	VL 3 B 3 60
	#120	VL 2 A 1 120	VL 1 B 1 120	VL 4 B 1 120	VL 3 A 2 120	VL 2 A 3 120	VL 1 B 2 120	VL 4 B 2 120	VL 3 B 3 120
	#220	VL 2 A 1 220	VL 1 B 1 220	VL 4 B 1 220	VL 3 A 2 220	VL 2 A 3 220	VL 1 B 2 220	VL 4 B 2 220	VL 3 B 3 220
	#400	VL 2 A 1 400	VL 1 B 1 400	VL 4 B 1 400	VL 3 A 2 400	VL 2 A 3 400	VL 1 B 2 400	VL 4 B 2 400	VL 3 B 3 400
	#600	VL 2 A 1 600	VL 1 B 1 600	VL 4 B 1 600	VL 3 A 2 600	VL 2 A 3 600	VL 1 B 2 600	VL 4 B 2 600	VL 3 B 3 600
	#800	VL 2 A 1 800	VL 1 B 1 800	VL 4 B 1 800	VL 3 A 2 800	VL 2 A 3 800	VL 1 B 2 800	VL 4 B 2 800	VL 3 B 3 800
	#1200	VL 2 A 1 1200	VL 1 B 1 1200	VL 4 B 1 1200	VL 3 A 2 1200	VL 2 A 3 1200	VL 1 B 2 1200	VL 4 B 2 1200	VL 3 B 3 1200
	Lustró	VL 2 A 1 Lustró	VL 1 B 1 Lustró	VL 4 B 1 Lustró	VL 3 A 2 Lustró	VL 2 A 3 Lustró	VL 1 B 2 Lustró	VL 4 B 2 Lustró	VL 3 B 3 Lustró
	#24	VL 3 A 1 24	VL 2 B 1 24	VL 1 A 2 24	VL 4 A 2 24	VL 3 A 3 24	VL 2 B 2 24	VL 1 B 3 24	VL 4 B 3 24
	#36	VL 3 A 1 36	VL 2 B 1 36	VL 1 A 2 36	VL 4 A 2 36	VL 3 A 3 36	VL 2 B 2 36	VL 1 B 3 36	VL 4 B 3 36
	#60	VL 3 A 1 60	VL 2 B 1 60	VL 1 A 2 60	VL 4 A 2 60	VL 3 A 3 60	VL 2 B 2 60	VL 1 B 3 60	VL 4 B 3 60
	#120	VL 3 A 1 120	VL 2 B 1 120	VL 1 A 2 120	VL 4 A 2 120	VL 3 A 3 120	VL 2 B 2 120	VL 1 B 3 120	VL 4 B 3 120
#220	VL 3 A 1 220	VL 2 B 1 220	VL 1 A 2 220	VL 4 A 2 220	VL 3 A 3 220	VL 2 B 2 220	VL 1 B 3 220	VL 4 B 3 220	
#400	VL 3 A 1 400	VL 2 B 1 400	VL 1 A 2 400	VL 4 A 2 400	VL 3 A 3 400	VL 2 B 2 400	VL 1 B 3 400	VL 4 B 3 400	
#600	VL 3 A 1 600	VL 2 B 1 600	VL 1 A 2 600	VL 4 A 2 600	VL 3 A 3 600	VL 2 B 2 600	VL 1 B 3 600	VL 4 B 3 600	
#800	VL 3 A 1 800	VL 2 B 1 800	VL 1 A 2 800	VL 4 A 2 800	VL 3 A 3 800	VL 2 B 2 800	VL 1 B 3 800	VL 4 B 3 800	
#1200	VL 3 A 1 1200	VL 2 B 1 1200	VL 1 A 2 1200	VL 4 A 2 1200	VL 3 A 3 1200	VL 2 B 2 1200	VL 1 B 3 1200	VL 4 B 3 1200	
Lustró	VL 3 A 1 Lustró	VL 2 B 1 Lustró	VL 1 A 2 Lustró	VL 4 A 2 Lustró	VL 3 A 3 Lustró	VL 2 B 2 Lustró	VL 1 B 3 Lustró	VL 4 B 3 Lustró	

Legenda: Etapa correspondente a um ciclo de polimento.

Figura 6. Exemplo de tabela confeccionada para controle dos ciclos de polimento no charnockito Verde Labrador.

Após o término do polimento em cada granulometria de abrasivos, os mesmos foram substituídos pela granulometria seguinte e foi seccionada uma amostra de rocha com auxílio de uma serra de mão para posterior medição do brilho superficial, nesta etapa cada uma das 720 amostras coletadas ao longo da pesquisa foi

realizada 30 medições de brilho, totalizando 21.600 medidas.

Para identificar a perda de massa de abrasivo em cada etapa, antes e depois de cada ciclo de polimento, os mesmos foram secos em uma estufa ventilada durante uma hora sob uma temperatura de 45°C e pesados.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Análise petrográfica

As análises petrográficas foram realizadas em consonância com as diretrizes expressas na norma da ABNT NBR 15845-anexo A (ABNT, 2010a). A Tabela 1 reúne a composição

mineralógica e as principais características texturais e estruturais dos referidos materiais com objetivo de auxiliar a interpretação dos resultados de caracterização tecnológica a ser apresentado na sequência.

Tabela 1. Síntese dos dados petrográficos das rochas estudadas.

Nome Comercial	Verde Labrador	Cinza Castelo	Preto Indiano		
			Paleossoma	Leucossoma	*Média (%)
Mineralogia	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Quartzo	28	32	27	32	28
Microclínio	-	35	4	28	8,8
Ortoclásio	40,0	-	-	-	-
Oligoclásio	20	22	40	36	39,2
Biotita	4,5	5,5	20	3,5	16,7
Hornblenda	1,5	-	-	-	-
Diopsídio / Hiprstenio	2,5 / 1,5	-	-	-	-
Granada	-	-	1,0	0,5	0,9
Opacos	1,5	1	1	tr	0,8
Apatita	tr	0,2	tr	tr	tr
Titanita	-	0,2	-	-	-
Zircão	tr	tr	tr	tr	tr
Allanita	-	0,1	-	-	-
Sillimanita	-	-	5	-	4,0
Clorita	tr	0,5	tr	tr	tr
Muscovita	-	1	2	tr	1,6
Sericita	0,5	2,5	tr	tr	tr
Carbonatos	tr	tr	tr	tr	tr
Epidoto	tr	tr	tr	tr	tr
Óxidos/Hidróxidos de ferro	tr	tr	tr	tr	tr
Quartzo + Fedspatos	88	89	71	96	76
Minerais máficos e demais pesados	12	11	29	4	24
Classificação	charnockito	monzogranito	migmatito gnaissificado		
Estrutura	levemente orientada	gnássica	gnássica		
Textura	fanerítica inequigranular	fanerítica equigranular	granoblástica a granolepidoblástica		
Transformação Mineral	incipiente	incipiente	incipiente		
Granulação (mm)	Variação	0,3 a 30	0,1 a 5,0	0,3 a 4,5	0,3 a 10,0
	Predominância	0,5 a 15,0	0,7 a 2	1,5 a 4	1,5 a 4,0
Microfissuras/mm ²		3,4	0,74	0,87	1,65
Microfissuras (%)	Intragrãos vazias	31	13	27	20
	Intragrãos preenchidas	58	79	55	60
	Intergrãos vazias	3,5	2,5	6	5
	Intergrãos preenchidas	7,5	5,5	12	15
Contato Mineral (%)	Côncavo-convexo	74	81,5	63,5	76,5
	Serrilhado	2	3,5	7,5	4,5
	Plano	24	15	29	19

Nota: *Média - médias da % mineralógica, microfissuras e contatos minerais do Preto Indiano (migmatito gnaissificado) equivale a uma proporção de 80% para o paleossoma e 20% para o leucossoma.

Caracterização tecnológica

A Tabela 2 reúne os resultados médios dos

ensaios de caracterização tecnológica obtidos nas rochas estudadas.

Tabela 2. Valores médios dos resultados físico-mecânicos com respectivos desvios padrão.

Ensaios		Verde Labrador	Cinza Castelo	Preto Indiano
Índices Físicos	Densidade aparente (kg/m ³)	2.694 ± 7,59	2.666 ± 1,17	2.791 ± 25,06
	Porosidade aparente (%)	0,43 ± 0,02	0,67 ± 0,01	0,42 ± 0,11
	Absorção de água (%)	0,16 ± 0,01	0,25 ± 0,01	0,15 ± 0,04
Desgaste Amsler (mm) (paralelo à foliação)	Percurso de 500 m	0,47 ± 0,05	0,54 ± 0,01	0,73 ± 0,10
	Percurso de 1.000 m	0,95 ± 0,02	1,11 ± 0,02	1,40 ± 0,16
Abrasão Profunda (mm ³)	Paralelo à foliação	155 ± 16,17	195 ± 4,73	202 ± 4,73
Velocidade Onda Ultrassônica (m/s)	Paralelo à foliação		4.138 ± 243,3	4.938 ± 596,9
	Normal à foliação		3.793 ± 153,0	4.531 ± 350,3
	Sem direção preferencial	5.219 ± 357,4		
Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)	Paralelo à foliação		111,1 ± 22,7	90,4 ± 12,2
	Normal à foliação		139,8 ± 20,2	84,1 ± 16,5
	Sem direção preferencial	102,9 ± 10,8		
Coeficiente Dilatação Térmica Linear (10 ⁻³ mm/m °C)	Paralelo à foliação		5,8	9,2
	Normal à foliação		6,9	9,8
	Sem direção preferencial	4,6		
Microdureza Knoop	HK ₂₅	6,39	5,98	2,05
	HK ₅₀	7,18	7,36	7,93
	HK ₇₅	8,06	9,59	11,42
	HK _{média}	7,38	7,40	7,52
	HK ₇₅ /HK ₂₅	1,26	1,60	5,57

Densidade Aparente, Porosidade Aparente e Absorção de Água (Índices Físicos)

Os resultados dos Índices Físicos (Tabela 2), obtidos segundo diretrizes da norma ABNR NBR 15845 - anexo B (ABNT, 2010b), apresenta boa correspondência com as características petrográficas e atendem os requisitos especificados pela norma ABNT NBR 15844 (ABNT, 2010g), ou seja, os materiais apresentam valores de densidade aparente superiores a 2.560 kg/m³, de porosidade aparente inferiores a 1% e de absorção de água abaixo de 0,4%.

A densidade aparente está intimamente relacionada com a densidade dos minerais constituintes das rochas e a porosidade aparente (proporção de sólidos e vazios). A Figura 7 mostra a relação entre a densidade aparente e o percentual de minerais máficos e demais minerais pesados e a Figura 8 a correlação entre a porosidade aparente e a absorção de água.

Dentre as rochas estudadas, o migmatito gnaissificado Preto Indiano apresenta a menor porosidade aparente (0,42%) e a maior percentagem de minerais máficos e pesados (24,0%) respaldando, assim, a maior densidade aparente obtida (2.791kg/m³). O granito Cinza Castelo exhibe a maior porosidade aparente (0,67%) e o menor percentual de máficos e

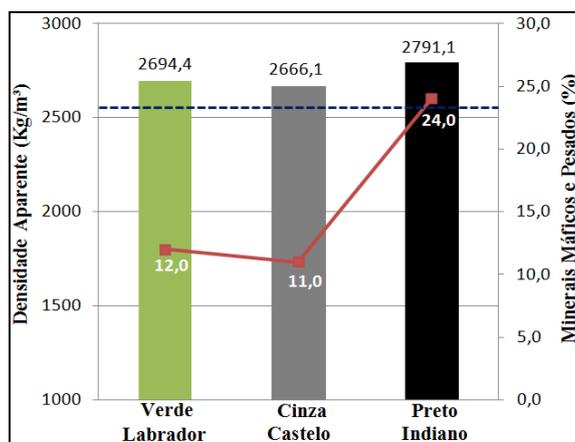
demais pesados (total de 11,0%), condicionando a menor densidade aparente registrada (2.666kg/m³). Por fim, o charnockito Verde Labrador com porosidade (0,43%) e percentual total de minerais máficos e demais pesados de 12%, apresentou densidade aparente intermediária de 2.694kg/m³.

A absorção de água é controlada pela combinação de vários aspectos texturais e estruturais exibidos pelas rochas. A porosidade e o grau de microfissuramento são agentes facilitadores da percolação de fluídos na rocha, sendo que quanto maior a porosidade e o índice de fissuras abertas, maior será a absorção de água.

Observa-se, conforme Figura 8, que o granito Cinza Castelo apresentou a maior porosidade aparente (0,67%) e a maior absorção d'água (0,25%). Esta rocha exhibe aspecto estético homogêneo, granulação fina a média, contatos minerais dos tipos côncavos/convexos, por vezes dentados e localmente retilíneos, baixo grau de microfissuramento e um excelente engrenamento mineral. A estrutura finamente foliada, com evidente estiramento mineral, é caracterizada por pronunciado adelgaçamento dos grãos minerais, que por representarem descontinuidades físicas facilitariam a percolação de água,

podendo assim justificar o resultado obtido. Também a presença de cristais de plagioclásio fortemente saussuritizados, bem como de

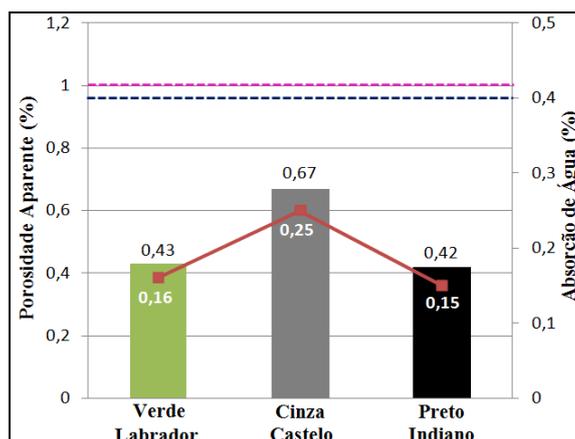
interfaces minerais contendo produtos de alteração destes feldspatos, são fatores que contribuem para a absorção da água.



Legenda: —■— Percentual de minerais máficos e pesados presentes nas rochas; — — — Requisito mínimo para Densidade Aparente em granitos (2550 kg/m³), conforme indicação da Norma NBR 15844/2010g.

Nota: Para definição do percentual de minerais máficos no gnaisse Preto Indiano foi considerado uma proporção de 80% paleossoma e 20% leucossoma.

Figura 7. Correlação entre a densidade aparente e o percentual de minerais máficos e pesados.



Legenda: —■— Percentual de absorção de água apresentado pelas rochas; — — — Requisito máximo (0,4%) para Absorção de água em granitos; — — — Requisito máximo (1%) para Porosidade Aparente em granitos conforme indicação da Norma NBR 15844/2010g.

Figura 8. Correlação entre a porosidade aparente e a absorção de água.

O gnaisse Preto Indiano com 0,42% de porosidade e 0,15% de absorção de água é o tipo petrográfico que apresentou os melhores resultados médios, cabendo, neste sentido, salientar que a baixa porosidade condiciona ao melhor fechamento e obtenção do brilho na etapa polimento. Trata-se de um migmatito gnaissificado, bastante heterogêneo, contendo listras e microleitos descontínuos a lenticulares (quartzo-feldspáticos) inseridos em um material paleossômico de granulação média bem menor que as frações leucossômicas quartzo-feldspáticos que, no conjunto, produzem uma estrutura bandada a movimentada à rocha. O grau de microfissuramento é variável, reflexo

da natureza metatexítica da rocha, sendo baixa na porção paleossômica (amplamente predominante na rocha) e moderado nas frações leucossômicas quartzo-feldspáticas. Em ambas as frações as microfissuras dominantes são do tipo intragrão, preferencialmente preenchidas, e com baixa intercomunicabilidade. Os baixos percentuais de porosidade e absorção de água, apresentados pela rocha, podem estar relacionados às propriedades petrográficas da porção paleossômica (baixo grau de microfissuramento; granulação relativamente mais fina; textura metamórfica caracterizada por boa recristalização mineral com intenso imbricamento entre os cristais constituintes) e

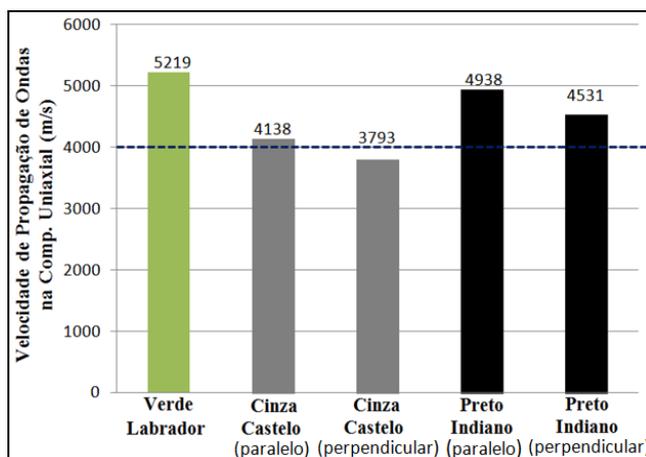
que por envolverem as frações quartzo-feldspáticas leucossômicas reduzem consideravelmente a comunicabilidade entre as redes porosas das duas frações da rocha (paleossômica e leucossômica).

O charnockito Verde Labrador mostrou condicionamento intermediário, com resultado similar ao Preto Indiano, exibindo taxas de 0,43% para a porosidade aparente e de 0,16% de absorção de água. Esta rocha exibe estrutura discretamente orientada, textura fanerítica equigranular com granulação média a grossa e contatos imbricados, refletindo em um bom entrelaçamento mineral. O microfissuramento mineral é moderado a elevado, com ampla predominância do tipo intragrãos (quase 90% do total das microfissuras), normalmente preenchidas, na grande maioria das vezes presentes no interior dos cristais maiores de quartzo e de feldspato potássico (raramente atingindo ou transpondo as bordas minerais) e aos planos de clivagens mais ou menos abertos dos cristais de piroxênios. As microfissuras

intergrãos (pouco mais de 10% das microfissuras), e raras transgranulares, são de pequenas dimensões, na maioria das vezes envolvendo dois minerais, com amplo predomínio de planos preenchidos por minerais secundários. Conclui-se, desta forma, que a rede porosa estaria restrita à microfissuras intergrãos e algumas transgranulares sem preenchimentos, o que limitaria a absorção e consequente circulação da água.

Propagação de Ondas Ultrassônicas Longitudinais (Vp)

A velocidade da propagação de ondas ultrassônicas foi obtida em corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão uniaxial, obedecendo às diretrizes da norma ASTM D 2845 (ASTM, 2008). Os resultados obtidos (Tabela 2) são comparados com o valor médio para rochas silicáticas brasileiras (de 4.000 m/s) apresentado por Frazão & Farjallat (1995), conforme representado na Figura 9.



Legenda: — Média (4000 m/s) para rochas silicáticas brasileiras apresentada por Frazão & Farjallat (1995).

Figura 9. Resultados da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (Vp)

O charnockito Verde Labrador apresentou a maior Vp (5.219 m/s) dentre as rochas estudadas. O resultado pode ser explicado por suas características petrográficas e físicas. Corresponde a uma rocha de aspecto geral homogêneo, com textura fanerítica de granulação média a média/grossa, pouco inequigranular, com estrutura discretamente orientada, além de exibir baixa porosidade e bom entrelaçamento mineral.

O resultado de Vp no granito Cinza Castelo foi 4.138 m/s no sentido paralelo à orientação mineral e 3.793 m/s perpendicular à foliação,

resultando na menor média (3.965 m/s) dentre as três rochas. Também é a única rocha a apresentar valor médio de propagação abaixo do obtido por Frazão & Farjallat (1995) como média para as rochas silicáticas brasileiras. Este resultado pode ser atribuído à estrutura finamente foliada, baixo percentual de minerais máficos e ao seu maior índice de porosidade dentre as rochas estudadas, fatores estes que diminuem a propagação das ondas ultrassônicas, amortecida pelas discontinuidades físicas dos planos de foliação, densidade mineral e

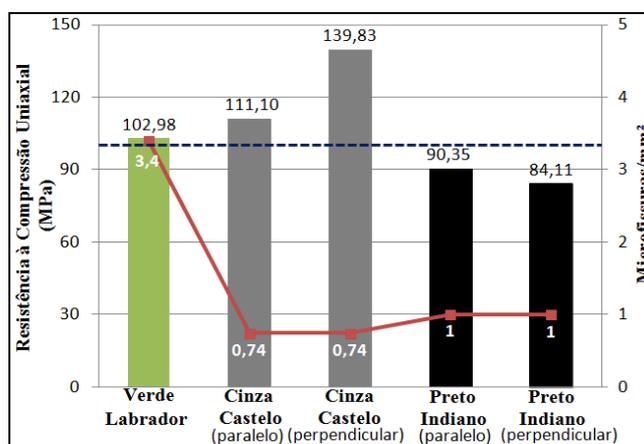
presença de rede porosa pouco mais elevada que as outras duas rochas.

O Preto Indiano apresentou V_p intermediário de 4.938 m/s no sentido paralelo à foliação e 4.531 m/s perpendicular à foliação da rocha, com média de 4.734 m/s. Esta rocha exibe padrão heterogêneo marcante, onde a intensidade da gnaissificação é relativamente variável. Vários são os fatores que favorecem a boa propagação das ondas ultrassônicas deste material, destacando-se os respectivos percentuais de minerais máficos e pesados (24%) que conduzem a uma maior densidade para a rocha, a boa sanidade, a reduzida porosidade aparente,

o baixo grau de microfissuramento e a boa recristalização metamórfica, tendo como resultado um melhor imbricamento mineral.

Resistência à Compressão Uniaxial

Os ensaios foram realizados de acordo com procedimentos estabelecidos pela norma ABNT NBR 15845- anexo E (ABNT, 2010c). Os resultados (Tabela 2) são na Figura 10 correlacionados aos respectivos graus de microfissuramento das rochas estudadas e com o valor de 100 MPa considerado pela norma ABNT NBR 15844 (ABNT, 2010g) como requisito mínimo para granitos.



Legenda: — Microfissuras/mm²; — Requisito mínimo (100 MPa) para Resistência à Compressão Uniaxial em granitos, conforme indicação da norma NBR 15844/2010.

Figura 10. Correlação entre resistência à compressão uniaxial e o grau de microfissuramento.

O gnaiss Preto Indiano apresentou resistência à compressão uniaxial de 90,4 MPa no sentido paralelo e 84,1 MPa perpendicular a foliação da rocha, exibindo a menor média (87,2 MPa) entre as variedades petrográficas estudadas. Também representou o único resultado abaixo do requisito especificado pela ABNT NBR 15844 (ABNT, 2010g) estipulado em 100 MPa. A baixa resistência mecânica fornecida está relacionada com a heterogeneidade composicional, textural e estrutural da rocha, dada pela presença de leitos/lentes, veios, filetes e bolsões leucossômicos quartzo-feldspáticos com granulação média a grossa, inequigranular, imersos em massa paleossômica relativamente rica em biotita e sillimanita. Estruturalmente, apresenta marcante foliação gnáissica bandada de aspecto geral estromático a pouco dobrado, que, no conjunto, representam planos de descontinuidades físicas responsáveis pela redução da resistência mecânica. As

tenacidades de diferentes minerais podem influenciar na maior ou menor susceptibilidade à ruptura, o que pode ser relacionado com o tipo de fratura ou clivagem apresentada.

O granito Cinza Castelo se destacou das demais rochas estudadas fornecendo a maior tensão na resistência à compressão uniaxial, com 139,8 MPa perpendicularmente à foliação e 111,1 MPa paralelamente à foliação, com média de 125 MPa. Sua elevada resistência mecânica em relação às duas outras rochas deve-se a sua homogeneidade petrográfica, granulação relativamente fina (predominantemente entre 0,7 a 2,0mm), equigranular, baixo teor de biotita, além da boa sanidade e menor grau de microfissuramento mineral (0,74 microfissuras/mm²) associada à relativamente baixa porosidade (0,67%).

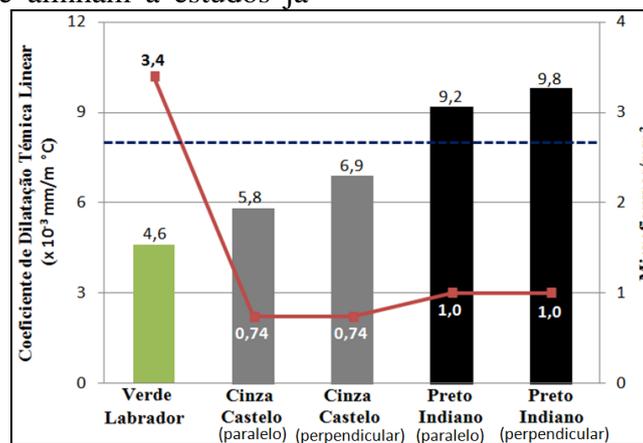
Por sua vez o charnockito Verde Labrador com textura inequigranular e granulação média a grossa apresentou uma resistência de 102,9 MPa. Apesar de seu aspecto petrográfico

bastante homogêneo, sua menor resistência em relação ao granito Cinza Castelo, deve-se, entre outros fatores, a sua maior granulação e principalmente ao maior grau de microfissuramento ($3,4 \text{ microfissuras/mm}^2$), bem como ao teor pouco mais elevado de minerais máficos, normalmente com planos de clivagens abertos.

Coefficiente de Dilatação Térmica Linear

Realizado de acordo com a norma ABNT NBR 15845 - anexo C (ABNT, 2010d), os resultados (Tabela 2) se alinham a estudos já

realizados por Frazão & Farjallat (1995) e Lima (2002). Estes autores ressaltaram que a dilatação térmica depende da composição mineralógica (principalmente do conteúdo de quartzo para o caso de granitos), microfissuramento da rocha, anisotropia estrutural, fatores petrográficos tais como porosidade, tamanho dos cristais e a relações de contatos minerais. A Figura 11 mostra a correlação entre a dilatação térmica linear e o grau de microfissuramento das rochas estudadas.



Legenda: — Microfissuras/ mm^2 ; — Requisito máximo ($8 \times 10^{-3} \text{ mm/m } ^\circ\text{C}$) para coeficiente de dilatação térmica em granitos, conforme indicação da norma ABNT NBR 15844/2010.

Figura 11. Correlação entre coeficiente de dilatação térmica linear e o grau de microfissuramento.

Dentre os materiais rochosos com coeficientes de dilatação dentro dos requisitos da norma citada estão o Cinza Castelo, com média de $6,3 \times 10^{-3} \text{ mm/m } ^\circ\text{C}$, e o Verde Labrador com média de $4,6 \times 10^{-3} \text{ mm/m } ^\circ\text{C}$. Este último resultado, extremamente baixo para uma rocha quartzo-feldspática, poderia resultar do seu elevado grau de microfissuras presentes na rocha ($3,4 \text{ microfissuras/mm}^2$), onde parte da dilatação é absorvida pelo fechamento do grande número de microfissuras existentes. Já o Preto Indiano apresentou dilatação média de $9,5 \times 10^{-3} \text{ mm/m } ^\circ\text{C}$, sendo este resultado superior aos requisitos máximos da norma. Este valor pode estar relacionado ao percentual de quartzo (28%) e, principalmente, com a percentagem de biotita (20%) da fração paleossômica e lineações melanossômicas das porções neossômicas.

O granito Cinza Castelo representa a variedade petrográfica cujo resultado médio, de $6,35 \times 10^{-3} \text{ mm/m } ^\circ\text{C}$, melhor se enquadra tanto em relação a sua natureza quartzo-feldspática quanto em relação as suas propriedades

petrográficas. Assim, mostra boa coerência com o percentual de quartzo (32%), granulação fina-média equigranular, baixo de microfissuramento mineral ($0,74 \text{ microfissuras/mm}^2$) e estrutura anisotrópica com valores de dilatação de $5,8 \times 10^{-3} \text{ mm/m } ^\circ\text{C}$ no sentido paralelo à foliação e de $6,9 \times 10^{-3} \text{ mm/m } ^\circ\text{C}$ perpendicular à estruturação.

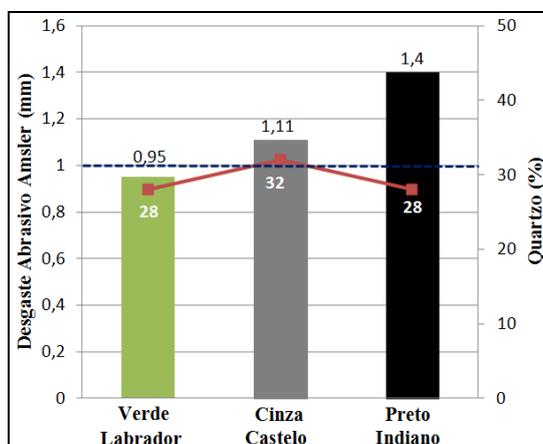
Resistência ao Desgaste Abrasivo Amsler

Entre os aspectos petrográficos mais importantes que influenciam na resistência ao desgaste abrasivo das rochas estão o percentual de minerais máficos e pesados, percentagem e dimensões de quartzo (dureza 7), compacidade, textura (arranjo mineral e granulação), grau de alteração mineral, grau de microfissuramento e a sanidade da rocha.

Os ensaios de abrasão Amsler foram realizados segundo diretrizes da norma ABNT NBR 12042 (ABNT, 1992), e os resultados médios obtidos expressos na Tabela 2. Nota-se que dos três tipos petrográficos estudados, somente o charnockito Verde Labrador, com

um desgaste de 0,95mm após 1000m, está dentro do valor referencial de desgaste ($\leq 1,0\text{mm}$) estabelecido pela norma ABNT NBR 15844 (ABNT, 2010g), seguidos respectivamente pelo Cinza Castelo e o Preto

Indiano, com desgaste de 1,11mm e 1,40mm. A Figura 12 conjuga os resultados obtidos com os percentuais de quartzo referentes às rochas estudadas.



Legenda: —■— Percentual de quartzo; — — — Requisito máximo (1,0mm/1000m) para Desgaste por Abrasão Amsler para granitos, conforme indicação da norma ABNT NBR 15844/2010g.

Nota: Para definição do teor de quartzo-feldspato no gnaiss Preto Indiano foi considerado uma proporção de 80% paleossoma e 20% leucossoma.

Figura 12. Correlação entre desgaste abrasivo Amsler e o percentual de quartzo.

Nota-se pelo diagrama acima que o percentual de quartzo não representa o fator diferenciador na resistência ao desgaste abrasivo entre as rochas estudadas, já que todas elas apresentam teores de quartzo bastante similares. Assim, os fatores diferenciadores na resistência à abrasão destas rochas estariam relacionados às respectivas variações composicionais, texturais e estruturais inerentes a cada variedade petrográfica considerada.

O litotipo Verde Labrador, com o menor desgaste abrasivo (0,95 mm), apresenta discreta estruturação foliada com cristais de quartzo melhores desenvolvidos que, por exemplo, os presentes no granito Cinza Castelo. O quartzo ocorre preferencialmente em agregados monominerálicos alongados com dimensões que podem ultrapassar 1,5 cm na maior extensão, muitas vezes correspondendo a cristais maiores microgranulados com textura poligonizada, que, no conjunto, desenvolvem uma rede mais ou menos contínua que envolve parte dos demais minerais, melhorando a resistência abrasiva da rocha. Por outro lado, um desgaste de 0,95 mm pode ser considerado elevado para uma rocha quartzo-feldspática com aspecto petrográfico homogêneo, como para o caso do charnockito estudado. Esta redução da resistência abrasiva estaria

relacionada, em parte, à saussuritização mais ou menos intensa em determinados cristais de plagioclásio, bem como ao grau de microfissuramento relativamente elevado (3,4 microfissuras/mm²) e à frequência de minerais secundários infiltrados nas interfaces minerais, fatores estes que facilitam a desagregação de partículas dos minerais durante a fricção abrasiva.

O granito Cinza Castelo, embora com o maior percentual de quartzo entre as rochas (32%), granulação fina a média, baixo grau de microfissuramento, apresentou desgaste abrasivo elevado (1,11 mm), fato este possivelmente relacionado à estruturação finamente foliada da rocha que quando submetido a atrito abrasivo liberam maior quantidade de partículas minerais, principalmente de cristais de quartzo microfissurados. Outro fator importante a ser considerado é que no geral o tamanho do quartzo observado no Cinza Castelo é inferior ao notado no charnockito.

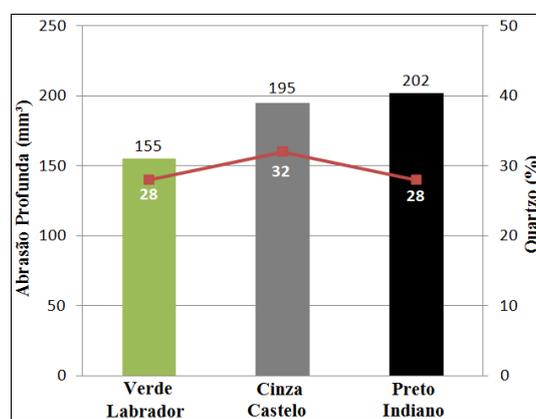
O gnaiss Preto Indiano apresentou o pior desempenho, fato este respaldado principalmente pelas suas características petrográficas como composição mineralógica, dada pelo elevado percentual de biotita (16,7%) e de sillimanita (4%), que além de intensamente microfissurada

está fortemente alterada para agregados filossilicáticos, bem como pela heterogeneidade textural e estrutural. Neste sentido, a rocha apresenta aspecto bandado, caracterizado por alternâncias de microleitos biotíticos com estruturas lepidoblásticas, quartzo-feldspáticos enriquecidos em biotita com estruturas granolepidobásticas e, por vezes, em sillimanita com estruturas nematoblásticas, além dos leitos leucossômicos faneríticos de granulação média a grossa com grau de microfissuramento relativamente elevado (1,65 microfissuras/mm²). A somatória destes fatores leva a uma redução da resistência à abrasão, seja pelas menores durezas dos minerais micáceos seja pela maior desagregação da rocha devido ao grau de microfissuramento e relações entre minerais com diferentes tenacidades. A menor

resistência da rocha observada no ensaio se traduziu em menor desgaste de abrasivo no processo de polimento.

Resistência a Abrasão Profunda

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Revestimentos Cerâmicos da Escola SENAI “Mario Amato” de São Bernardo do Campo, segundo diretrizes da norma ABNT NBR 13818 (ABNT, 1997). Os resultados da resistência à abrasão profunda (Tabela 2) são correlacionados com o percentual de quartzo conforme representado na Figura 13. Destaca-se que por se tratar de um teste que avalia a resistência ao desgaste da rocha, os fatores petrográficos interferentes no comportamento das rochas são similares aos considerados para a interpretação do desgaste abrasivo Amsler.



Legenda: —■— Percentual de quartzo presente nas rochas.

Nota: Para definição do percentual de quartzo-feldspato no gnaiss Preto Indiano foi considerado uma proporção de 80% paleossoma e 20% leucossoma.

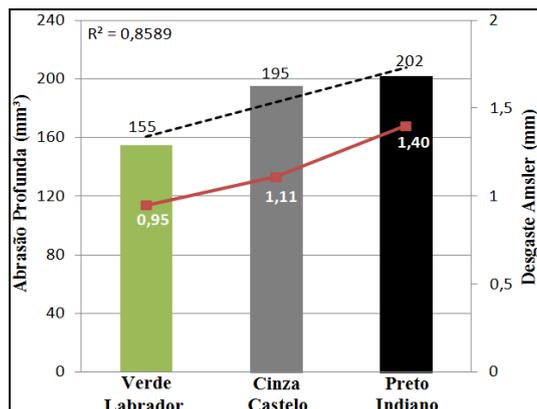
Figura 13. Correlação entre os resultados de desgaste (abrasão profunda) e o percentual de quartzo.

O charnockito Verde Labrador apresentou o menor volume médio de material desgastado (155mm³), ficando acima do referido valor o granito Cinza Castelo (195mm³) e o gnaiss Preto Indiano (202mm³). A Figura 14 mostra a correspondência direta entre os resultados de ensaios de desgaste realizados (Abrasão Profunda e Amsler) apresentando um coeficiente de correlação alto ($R^2=0,8589$), refletindo em maior confiabilidade no que se refere ao desgaste.

Como no caso do desgaste abrasivo Amsler, acima comentado, os percentuais de quartzo das rochas não representam o fator diferenciador primordial na resistência ao desgaste da abrasão profunda, e sim outros aspectos composicionais, texturais e estruturais exibidos pelos materiais rochosos estudados.

Assim, a resistência pouco superior apresentada pelo charnockito Verde Labrador (Figura 13) deve-se, provavelmente, às homogeneidades composicional, textural e estrutural exibidas, além da fraca orientação mineral e a presença de cristais de quartzo relativamente bem desenvolvidos (os cristais maiores atingem até 1,5cm) mais ou menos interligados entre si de forma a desenvolver uma malha ou rede de aspecto ligeiramente achatada a estirada que, no conjunto, envolve parcialmente os demais cristais da rocha. Tais propriedades petrográficas compensam, em parte, a fragilidade da rocha devida ao grau de microfissuramento elevado (3,4 microfissuras/mm²) responsável por facilitar a desagregação superficial da rocha, com

consequente liberação de micropartículas minerais.



Legenda: — Desgaste Amsler apresentado pelas rochas; Volume de desgaste da Abrasão Profunda.

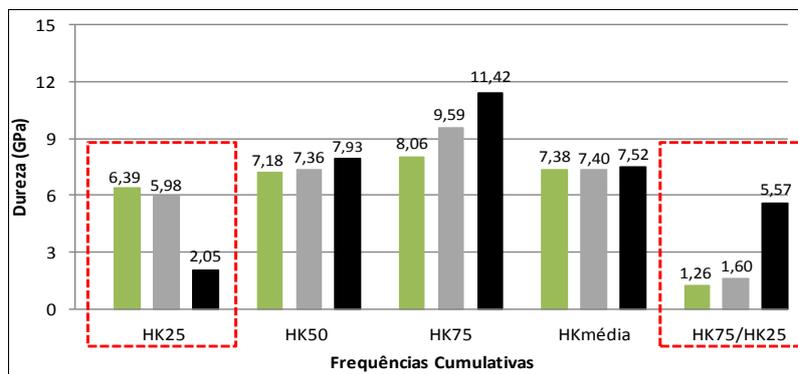
Figura 14. Correlação entre os resultados de desgaste Abrasão Profunda e o desgaste abrasivo Amsler.

O desgaste de 195 mm³ apresentado pelo granito Cinza Castelo, valor de desgaste intermediário entre as rochas estudadas, corresponde, da mesma forma que o verificado no caso do desgaste abrasivo Amsler (1,11 mm) (Figuras 12), a um valor consideravelmente alto para um granito detentor de textura homogênea, com granulação fina a fina-média e com 32% de quartzo. Estes elevados valores podem ser interpretados como consequências de sua estrutura finamente foliada, caracterizada por intenso estiramento mineral, e pela marcante saussuritização de boa parte dos cristais de plagioclásio, cujos produtos de alteração comumente se infiltram em planos de microfissuras e nas interfaces dos minerais vizinhos, fatores estes que no conjunto facilitam a desagregação superficial da rocha.

Assim como no ensaio de desgaste Amsler (Figuras 12 e 14), o gnaisse Preto Indiano apresentou o pior desempenho, proporcionado principalmente pela heterogeneidade de suas características petrográficas e estruturais. A estrutura bandada, definida pela alternância entre níveis paleossômicos e leucossômicos com diferentes composições mineralógicas, somados ao alto percentual de biotita (16,7%), contribuiu para o resultado apresentado.

Microdureza Knoop

Realizado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, São Paulo, segundo procedimentos ditados pela norma EN 14205 (EM, 2003). Os resultados de microdureza Knoop obtidos (Tabela 2) são apresentados graficamente na Figura 15.



Legenda: Verde Labrador (coluna verde); Cinza Castelo (coluna cinza); Preto Indiano (coluna preta). O polígono tracejado em vermelho destaca os principais resultados a serem abordados.

Figura 15. Representação dos resultados de microdureza knoop: relação da frequência cumulativa e a dureza correspondente.

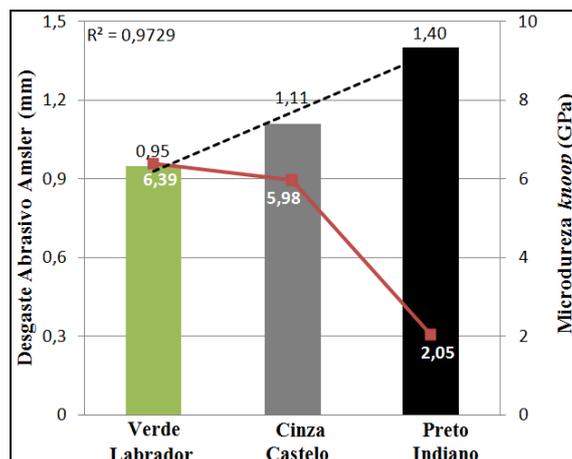
É possível observar que o migmatito gnáissico Preto Indiano apresenta elevado

coeficiente de heterogeneidade (HK₇₅/HK₂₅) comparativamente às outras duas rochas, fato

este atribuído a presença de minerais com significativas diferenças de dureza entre as frações paleossômicas e leucossômicas da rocha. Os materiais Verde Labrador e Cinza Castelo apresentaram semelhança no coeficiente de heterogeneidade, o que reflete suas maiores homogeneidades composicionais e texturais.

A melhor correlação linear entre dureza

Knoop e o desgaste abrasivo Amsler foi obtida como parâmetro HK25, confirmando a tendência observada por Frisa Morandini & Mancini (1982) e Quitete & Kahn (2002) com a hipótese de que os minerais essenciais de dureza mais baixa são os principais condicionantes da resistência ao desgaste abrasivo. A Figura 16 mostra a correlação entre microdureza *knoop* e desgaste abrasivo Amsler.



Legenda: — Valor de microdureza *Knoop* apresentado pelas rochas; Coeficiente de correlação.

Nota: A frequência cumulativa considerada foi HK₂₅.

Figura 16. Correlação entre o desgaste abrasivo Amsler e a microdureza *knoop*.

Os resultados expressam uma boa correlação entre as rochas estudadas, havendo uma tendência à proporcionalidade direta, ou seja, quanto maior a dureza menor o desgaste ($R^2 = -0,96$ para HK25). Assim como para o caso dos ensaios de resistência ao desgaste Amsler e abrasão profunda, este resultado pode ser utilizado como subsídio na interpretação do desgaste abrasivo, podendo contribuir na interpretação do grau de interação entre o abrasivo e a rocha.

De acordo com o observado, a rocha é um componente do tribossistema e o conjunto de suas características petrográficas condiciona a resistência da mesma frente a uma determinada solicitação de desgaste (ensaio ou polimento).

Observa-se pelos resultados acima discutidos que a perda de massa dos rebolos abrasivos está diretamente relacionada à resistência ao desgaste abrasivo da rocha (desgaste Amsler; abrasão profunda) e microdureza *knoop* (Tabela 2), a qual, por sua vez, está na dependência da composição mineralógica e demais aspectos texturais e estruturais exibidos pelas rochas (Tabela 1).

Dentre as propriedades petrográficas, a resistência à abrasão é diretamente influenciada pelo grau de sanidade da rocha e pela dureza de seus minerais constituintes. Assim rochas ricas em cristais de quartzo, com dureza 7, são mais resistentes a abrasão que rochas ricas em minerais micáceos com durezas entre 2 e 3. A granulação da rocha também exerce grande influência na resistência abrasiva, sendo que rochas de granulação grossa tendem a apresentar contatos interminerais mais frouxos e maior grau de microfissuramento intragrãos, bem como planos de clivagens mais desenvolvidos, bastante evidentes no caso do feldspato potássico, que, no conjunto, além de aumentar a porosidade da rocha, facilitam a liberação de micropartículas durante solicitações abrasivas. Por outro lado, a experiência tem demonstrado que dentre rochas com teores similares de quartzo aquelas com cristais de quartzo mais desenvolvidos se mostram mais resistentes aos esforços abrasivos que aquelas com cristais de quartzo de menores dimensões e de ocorrência predominantemente do tipo intersticial.

Há também de se considerar a anisotropia estrutural da rocha, onde rochas com estruturas foliadas são detentoras de planos mais ou menos contínuos, normalmente caracterizados por contatos minerais justapostos que conduzem a repetidas descontinuidades físicas e que, além de reduzirem a resistência mecânica da rocha, facilitam o desgaste abrasivo pela maior liberação de micropartículas minerais nas interfaces interplanares.

Assim, o Preto Indiano, uma rocha migmatítica com estrutura gnáissica (bandada a acamada) definida pela alternância entre níveis enriquecidos em micas (paleossoma) e níveis quartzo-feldspáticos subordinados (leucossoma), é um típico material anisotrópico e de elevada heterogeneidade petrográfica. Embora com o mesmo percentual de quartzo (28%) que o Verde Labrador, a rocha exibe o maior percentual de minerais micáceos (paleossoma com 22% de micas), além de 5% de sillimanita, conduzindo a porções granolepidoblásticas e mesmo nematoblásticas, fato que contribuiu para o rebaixamento da dureza da rocha. As dimensões do quartzo predominante na fração gnáissica escura (paleossoma) é de 1,5 a 4 mm enquanto na porção quartzo feldspática (leucossômica) é de 2 a 10 mm. Estas considerações estão de acordo com o menor valor de microdureza *knoop* HK₂₅ (2,05) entre as demais rochas testadas, sendo este um indicador de desgaste por abrasão conforme frisa Frisa Morandini & Mancini (1982) e estudos posteriores de Quitete & Kahn (2002) onde os minerais essenciais de dureza mais baixa (biotita e muscovita) são os principais condicionantes da resistência ao desgaste abrasivo. O resultado também apresentou correspondência com o desgaste Amsler (1,40 mm) e abrasão profunda (201,67 mm³) onde apresentaram os resultados mais baixos. No geral, os resultados de polimento, mostraram que esta rocha (macia em relação às demais) além de consumir menos abrasivo apresentou melhores resultados de brilho na maior parte das etapas, seguidos pelos materiais Verde Labrador e Cinza Castelo.

O charnockito Verde Labrador é uma rocha levemente orientada com textura fanerítica inequigranular, de granulação média a média-grossa, onde os cristais de quartzo representam

28% dos minerais constituintes. Como já discutido no item de desgaste abrasivo, os cristais de quartzo deste charnockito são preferencialmente alongados e bem desenvolvidos, com dimensões médias que variam de 0,5 a 15 mm ou constituindo agregados de cristais menores ajustados entre si ou, ainda, resultante de microgranulação de cristais maiores com típicas texturas poligonizadas que, no conjunto, desenvolvem uma rede mais ou menos contínua que envolve parte dos demais minerais, melhorando a resistência abrasiva da rocha. Esta rocha apresenta ainda percentual de máficos intermediário (11,5%) em relação às demais, além da menor porosidade aparente (0,42%). Os resultados de ensaio de microdureza *knoop* HK₂₅ sugerindo a maior resistência ao desgaste (6,36), foi confirmado tanto no desgaste Amsler (0,95mm) quanto na abrasão profunda (155,57mm³). Consequentemente esta rocha (mais dura em relação às demais) tem uma tendência de consumir mais abrasivo.

O granito Cinza Castelo com estrutura nitidamente orientada e textura fanerítica equigranular de granulação fina a média, exibe o maior percentual de quartzo (32%) entre as rochas (quartzo com dimensões que variam de 0,7 a 2mm), o menor grau de microfissuramento, a maior porosidade aparente (0,67%) e o menor percentual de minerais máficos (6,5%) entre as rochas. O resultado de microdureza *knoop* HK₂₅ (5,98) é intermediário, assim como os resultados do desgaste Amsler (1,11 mm) e abrasão profunda (195,33 mm³) em comparação com as demais rochas investigadas. Apesar do seu maior teor de quartzo em relação charnockito Verde Labrador, os resultados de resistência abrasivas pouco inferiores aos do charnockito devem-se, provavelmente, às dimensões bastante inferiores dos grãos de quartzo e a sua distribuição predominantemente intersticial. No geral esta rocha apresentou os menores brilhos na maior parte das etapas em comparação com as demais, o que também pode ser reflexo da dificuldade do “fechamento” do lustro em virtude da maior liberação de micropartículas minerais provocadas pelas descontinuidades físicas dos planos de foliação da rocha.

SÍNTESE DOS RESULTADOS TRIBOLÓGICOS DE POLIMENTO

A Tabela 3 apresenta uma síntese dos resultados tribológicos de polimento, onde pode

ser observado os melhores resultados de brilho em cada etapa.

Tabela 3. Síntese dos resultados tribológicos de polimento.

ABRASIVO (mesh)	Rocha	Velocidade de Rotação do Satélite (rpm)	Pressão do Satélite (kgf/cm ²)	Exposição do Satélite Sobre a Chapa	Maior Brilho (lux)	Perda de Massa de Abrasivos (g)
120	VL	400	2	3	14,80	2,68
	CC	400	2	2	11,00	2,24
	PI	300	2	3	18,40	1,56
220	VL	500	2	3	21,70	2,36
	CC	600	2	3	18,90	3,17
	PI	400	2	3	23,30	1,60
400	VL	400	2	2	40,40	2,47
	CC	500	2	3	35,10	3,56
	PI	300	2	3	40,10	2,44
600	VL	400	1	3	50,80	1,40
	CC	600	2	3	58,80	1,44
	PI	500	2	2	54,40	2,68
800	VL	300	2	3	63,10	1,45
	CC	400	2	3	65,60	0,81
	PI	400	2	2	67,50	0,33
1200	VL	600	2	3	71,20	0,95
	CC	300	2	3	72,20	0,92
	PI	500	2	3	77,00	1,08
LUSTRO	VL	400	2	2	86,70	1,03
	CC	300	1	3	84,00	0,01
	PI	400	2	3	84,80	0,17

Observa-se que apesar das rochas analisadas apresentarem diferentes comportamentos no tocante ao desgaste abrasivo, os testes de polimento revelaram que na maior parte dos casos a etapa de polimento com velocidade de rotação de satélite média/baixa (400/300 rpm) se mostrou mais eficiente na obtenção dos melhores resultados de brilho para as três

rochas estudadas. Foi possível observar que dentre as três rochas, dois terços dos maiores valores de brilho foram alcançados quando conjugado a maior pressão de carregamento do satélite (2kgf/cm²) com à exposição máxima ao processo testada (3), garantindo assim maior capacidade de desbaste, planificação e fechamento dos poros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre os ensaios físicos-mecânicos realizados, os resultados de resistência mecânica (compressão uniaxial), densidade aparente, coeficiente de dilatação térmica linear e a propagação de ondas longitudinais não mostram correlações diretas com os resultados experimentais de polimento. Por outro lado, os resultados de resistência ao desgaste abrasivo e microdureza *knoop*, os quais refletem a dureza das rochas, e a porosidade aparente mostram correlações diretas e evidentes com relação ao polimento.

Destaca-se que apesar da natureza quartzo-feldspática das três rochas, e detentoras de teores de quartzo similares, as condições operacionais na obtenção do brilho e consumo de abrasivo foram distintas, ou seja, variaram em função da combinação dos demais aspectos petrográficos inerentes a cada rocha. Neste sentido, pode-se dizer que a eficiência de polimento foi diretamente influenciada pelas proporções entre minerais de elevada resistência à abrasão, como quartzo e feldspatos (durezas 7 e 6, respectivamente), e de baixa

resistência, como micas (dureza entre 2 e 3), bem como pelo grau de anisotropia (foliação, gnaissificação), granulação, intensidade de

microfissuramento mineral e relações de contatos interminerais das rochas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Tecnologia Mineral-CETEM pela aquisição das chapas de rochas brutas e pelo apoio em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho, ao Instituto Federal de Educação-IFES, Campus de Cachoeiro de Itapemirim/ES, por disponibilizar a politriz para realização dos experimentos de polimento e à Cobral Abrasivos e Minérios Ltda. pela doação dos abrasivos magnesianos utilizados nesta pesquisa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais inorgânicos: determinação do desgaste por abrasão. NBR 12042: Rio de Janeiro, 1992, 3 p.
2. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Especificação e métodos de ensaios para placas cerâmicas de revestimento: determinação da resistência à abrasão profunda. NBR 13818, anexo E: Rio de Janeiro, 1997, p. 3.
3. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Análise petrográfica. NBR 15845, anexo A: Rio de Janeiro, 2010a, p. 3-5.
4. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água. NBR 15845, anexo B: Rio de Janeiro, 2010b, p. 6-8.
5. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resistência à compressão uniaxial. NBR 15845, anexo E: Rio de Janeiro, 2010c, p. 16-18.
6. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Coeficiente de dilatação térmica linear. NBR 15845, anexo C: Rio de Janeiro, 2010d, p. 9-12.
7. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rochas para revestimento: Requisitos para granitos. NBR 15844: Rio de Janeiro, 2010e, p. 1-3.
8. EN - EUROPEAN STANDARD NORME. Natural stone test methods. Determination of Knoop hardness. Norme 14205, 2003, 9 p.
9. ARTUR, A.C.; WERNICK, E.; RODRIGUES, E.P.; ANDRIGHETTI, R.M.; SOUZA, P.H.G. Perda de lustro em rochas ornamentais durante a abrasão progressiva: principais fatores condicionantes. In: IV SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 3, 2002, Recife. *Anais...* Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral/CETEM, 2002, p. 24-37.
10. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rocks. D 2845: West Conshohocken, 3 p., 2008.
11. BRANDÃO, W.; SARDDOU FILHO; QUEIROZ, E.T.; COELHO, C.E.S. **Principais Depósitos Minerais do Brasil (DNPM)**. Brasília, v. 4, parte A, p. 371-372, 1991.
12. EN - EUROPEAN STANDARD NORME. Natural stone test methods. Determination of Knoop hardness. Norme 14205, 2003, 9 p.
13. FRASCÁ, M.H. **Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento**. São Paulo, 2003. 264 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
14. FRAZÃO, E.B. & FARJALLAT, J.E.S. Características tecnológicas das principais rochas silicáticas brasileiras usadas como pedras de revestimento. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA PEDRA NATURAL, 1., 1995, Lisboa. *Anais...* Lisboa: Cimpor, 1995. p. 47-58.
15. FRAZÃO, E.B.; PARAGUASSU, A.B. **Materiais rochosos para construção**. In: GEOLOGIA DE ENGENHARIA. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA - ABGE, CNPq/FAPESP. São Paulo, p. 331-342, 1998.
16. FRISA MORANDINI, A. & MANCINI, R. Applications of microhardness tests to the technical evaluation of dimension stones. In: CONGRESS INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 4, 2006, New Delhi. *Anais...* New Delhi, 1982, p. 321-331.
17. KASCHNER, D. Tecnologias para beneficiamento. In: *Anais...* do II ENCONTRO DO CENTRO-OESTE SOBRE GRANITOS, MÁRMORES E PEDRAS ORNAMENTAIS, 2, 1996. *Anais...* p. 1-11, 1996.
18. LIMA, J.J.C. **Estudo da dilatação térmica de rochas usadas em revestimento de edificações**. São Carlos, 2002. 121 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
19. LIMA, M.A.B.; ARTUR, A.C.; NOGUEIRA NETO, J.A.; FIGUEIREDO, E.R.H.; GALINDO, A.C. Relação entre a condutividade térmica e parâmetros físicos dos Gnaisses Casablanca, JuparanáDelicato e Giallo Falésia (Ceará-Brasil). *Geociências*, v. 40, n. 1, p. 111-124, 2010.
20. MESQUITA, M.P.S. **Composição, estrutura, propriedades tecnológicas e alterabilidade dos granitos ornamentais do stock Morrinho, Santa Quitéria (CE)**. Rio Claro, 2002. 171 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
21. MEYER, A.P. **Influência da petrografia no comportamento tecnológico de rochas ornamentais do Complexo Socorro (SP) e maciço Pedra Branca (MG)**. Rio Claro, 2003. 117 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
22. NAVARRO, F.C. Granitos ornamentais: análise petrográfica na previsão do comportamento físico-mecânico. In: CONGRESO URUGUAYO DE GEOLOGIA, 2., Puntadel Este. *Actas...* Montevideu: Sociedad Uruguaya de Geologia; Facultad de Ciencias, 1998, p. 103-107.
23. NAVARRO, F.C. **Caracterização petrográfica como técnica para a previsão do comportamento físico e mecânico de "granitos" ornamentais**. Rio Claro, 2002. 88 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
24. NAVARRO, F.C. **Influência da petrografia sobre a anisotropia à tensão de compressão e dilatação térmica de rochas ornamentais**. Rio Claro, 2006. 221 p. Tese (Doutorado

em Geologia Regional) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

23. NAVARRO, F.C. & ARTUR, A.C. Correlação entre características petrográficas e propriedades tecnológicas de granitos ornamentais: proposição de equações matemáticas. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS E II SEMINÁRIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 2, 2001, Salvador. **Anais...** Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral/CETEM, 2001, p. 45-52.

24. NAVARRO, F.C. & ARTUR, A.C. Caracterização petrográfica como ferramenta para a previsão do comportamento físico e mecânico de granitos ornamentais: Uma Discussão. In: IV SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 3, 2002, Recife. **Anais...** Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral/CETEM, 2002, p. 1-8.

25. PAZETO, A.A. **Correlação entre propriedades petrográficas e comportamento tecnológico e de alterabilidade das rochas ornamentais silicáticas Diamante Negro (BA), Ocre Itabira e Branco Galaxy (ES)**. Rio Claro, 2011. 188 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

26. PETRAKIS, G.H.; MOTOKI, A.; SICHEL, S.E.; ZUCCO, L.L.; AIRES, J.R.; MELLO S.L.M. Ore geology of special quality gravel and artificial sand: examples of alkaline syenite of Nova Iguaçu, State of Rio de Janeiro, and rhyolite of Nova

Prata, State of Rio Grande do Sul, Brazil. **Geociências**, Rio Claro, v. 29, n. 1, p. 21-32, 2010.

27. QUITETE, E.B. & KAHN, H. Dureza knoop em rochas para revestimento: correlação com desgaste abrasivo. In: IV SIMPÓSIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 3, 2002, Recife. **Anais...** Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral/CETEM, 2002, p. 90-94.

28. RODRIGUES, E.P.; COUTINHO, J.M.V.; CHIODI FILHO, C. Petrografia microscópica: uma visão do passado, presente e futuro da rocha ornamental. **Rochas de Qualidade**, n. 127, p. 80-84, 1996.

29. RODRIGUES, E.P.; CHIODI FILHO, C.; COUTINHO, J.J.M. Importância da petrografia para a previsão do comportamento e da durabilidade de rochas ornamentais. Lisboa: **Rochas e Equipamentos**, v. 47, 2 p., 1997.

30. SILVEIRA, L.L.L. **Estudo comparativo de granitos ornamentais brasileiros no processo de polimento industrial**. São Carlos, 2007. 205 p. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

31. TUĞRUL, A. & ZARIF, I.H. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected Granitic rocks from Turkey. **Engineering Geology**, v. 51, p. 303-317, 1999.

Manuscrito recebido em: 13 de Setembro de 2013

Revisado e Aceito em: 27 de Agosto de 2015