



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



TESE DE DOUTORADO

**AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE DE ROCHAS XISTOSAS
PARA APLICAÇÕES COMO ROCHAS ORNAMENTAIS E DE
REVESTIMENTO**

AUTORA: Marcela Mourão Moura

ORIENTAÇÃO: Professor Dr. Antônio Gilberto Costa

Nº22

**BELO HORIZONTE
DATA (28/02/2012)**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA**



TESE DE DOUTORADO

**AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE DE ROCHAS XISTOSAS
PARA APLICAÇÕES COMO ROCHAS ORNAMENTAIS E DE REVESTIMENTO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Geologia Econômica e Aplicada.

AUTORA: Marcela Mourão Moura

ORIENTAÇÃO: Professor Dr. Antônio Gilberto Costa

Nº22

BELO HORIZONTE

Fevereiro de 2012

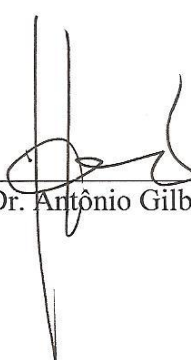
M929a Moura, Marcela Mourão.
2012 Avaliação da potencialidade de rochas xistosas para aplicações como rochas ornamentais e de revestimento [manuscrito] / Marcela Mourão Moura. – 2012.
xvi, 176 f. : il., fots. (color.), gráfs., mapas (color.), tabs.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2012.
Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.
Orientador: Antônio Gilberto Costa.
Bibliografia: f. 169-176.

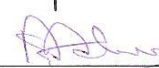
1. Rochas ornamentais – Minas Gerais – Teses. 2. Xisto – Minas Gerais – Teses. 3. Anisotropia – Teses. I. Costa, Antônio Gilberto. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 552.4(815.1)

Tese defendida e aprovada, em 28 de fevereiro de 2012, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Antônio Gilberto Costa



Prof. Dr. Antônio Carlos Artur



Prof. Dr. Joaquim Raul Francisco Torquato



Prof. Dr. Adejardo Francisco da Silva Filho



Profa. Dra. Hanna Jordt Evangelista

*A mente que se abre a uma
nova ideia jamais voltará a
seu tamanho original.*

Albert Einstein

Agradecimentos

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para a realização desta tese de doutorado:

Ao Prof. Dr. Antônio Gilberto Costa, orientador desta tese, pelos seus ensinamentos, contatos estabelecidos com especialistas da área e pela oportunidade de trabalhar com um tema tão instigante.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFMG, pela oportunidade de realizar este curso de doutorado.

Ao Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa (CPMTC) pela utilização de seus laboratórios.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pela bolsa concedida.

Ao programa Alfa- Faro, Formação Avançada no Sector das Rochas Ornamentais e do Geoprocessamento, pela oportunidade de intercâmbio com pesquisadores da Università degli Studi di Bologna.

Ao Prof. Roberto Bruno, coordenador do programa Alfa Faro, e ao Dr. Stefano Bonduà, da Università degli Studi di Bologna, pela gentil assistência durante minha estadia na Itália, pela visita às jazidas e monumentos em ardósia na Ligúria e pela orientação nos primeiros passos em processamento digital de imagens.

Agradeço aos professores Dr. Antônio Carlos Artur (UNESP), Dra. Lydia Maria Lobato (UFMG) e Dra. Maria Lourdes Souza Fernandes (UFMG), por suas preciosas observações, críticas e sugestões feitas na apresentação do seminário de qualificação.

Aos técnicos e pesquisadores do Centro de Microscopia da UFMG, cujo ambiente de pesquisa e alegria pelo conhecimento, foi fonte de muitos estímulos. Em especial, à Profa. Dra. Karla, que no meio de tantas atribuições, encontrou tempo para me explicar a essência da microscopia eletrônica. Ao Dr. Orlando, que me apresentou ao sistema MATLAB, que se tornou uma ferramenta facilitadora no desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço ao amigo Hélvio Junio Barcelos, técnico do Laboratório de Rochas Ornamentais-LABTECRochas do CPMTC, pela colaboração na execução dos ensaios. Observá-lo trabalhar de forma consciente e criteriosa foi um aprendizado.

Aos técnicos do laboratório de laminação, Fernando Soares de Souza e Wenceslau Rodrigo dos Santos, pela cuidadosa e paciente preparação das lâminas e seções polidas.

Ao técnico William Figueiredo, pelo auxílio na preparação das soluções analíticas e à Kácia Monteiro e à Amanda Lúcia da Silva, pelas análises de difração.

Agradeço à secretária da pós-graduação Maria Paula Borges Berlando, cuja eficiência e boa disposição muito me ajudaram.

À equipe da Biblioteca do IGC-UFMG, em especial à Elisabete Quatrini Vieira, Raquel Miranda Vilela e Marta Maria Mota Couto: sempre dispostas a colaborar.

Aos colegas de doutorado Luís Branco e Javier Bezerra, companheiros do Laboratório de Rochas Ornamentais, pelas discussões e incentivo.

Aos amigos e colegas de pós-graduação, com um carinho especial à Camila, Eliza, Mahyra e Jorge, grandes companheiros de viagem.

Agradeço ao amigo Charles Rezende Freitas, pela boa disposição em discutir as dificuldades e avanços nos procedimentos de PDI.

Ao geólogo Júlio Romeiro, sempre muito gentil e preciso em suas informações, que me indicou pontos de ocorrência de xistos com potencial para rocha ornamental, da região do Jequitinhonha.

Ao geólogo Hebert Lopes Oliveira por amostras do xisto verde.

Ao José Balbino Maia de Figueiredo, presidente do Sindicato das Indústrias de Rochas Ornamentais de Minas Gerais, pelas amostras e por me apresentar a pessoas que me ajudaram com amostras e acesso a áreas de pesquisa.

Às empresas K2 e Santantônio, pelos blocos e chapas de xisto da região do Jequitinhonha.

Ao Padre Judas Tadeu Vivas, Vigário Geral da Arquidiocese de Belo Horizonte, à Profa. Mônica, do memorial da arquidiocese de BH, ao Padre Carlos, Diácono Arnaldo, D. Elenice e D. Julia, da Paróquia de Nossa Senhora de Bonsucesso em Caeté.

À Profa. Mônica Tolentino, responsável pelo projeto Monumenta à época do levantamento realizado na Chácara do Barão do Serro.

Ao meu marido, Luiz Carlos Vannucci, por compreender e apoiar minha decisão pelo doutorado. Sua experiência como geólogo fez dele meu consultor e companheiro de muitos trabalhos de campo. Sua segurança foi essencial em muitos momentos.

Agradeço a Deus, à minha família e a meus amigos queridos, pelos quais anelo ser uma pessoa melhor a cada dia.

Agradeço a todos que de alguma forma fizeram parte deste trabalho.

Sumário

<i>Agradecimentos</i>	i
<i>Índice de Figuras</i>	v
<i>Índice de Tabelas</i>	xiv
<i>Resumo</i>	xv
<i>Abstract</i>	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Apresentação	1
1.2 Objetivos.....	3
2. APLICAÇÕES DE ROCHAS XISTOSAS: REFERÊNCIAS PARA A PESQUISA	4
2.1 Exemplos de aplicações.....	5
2.1.1 Basílica de San Salvatore dei Fieschi, Província de Gênova, Ligúria, Itália	5
2.1.2 Conjunto arquitetônico da Praça Minas Gerais em Mariana-MG	9
2.1.3 Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso, Caeté-MG	15
2.1.4 A Chácara do Barão do Serro, Serro-MG	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 Materiais	32
3.1.1 Seleção dos tipos de rochas xistosas pesquisadas	32
3.1.2 Contexto geológico das rochas xistosas pesquisadas	37
3.1.3 Localizações dos pontos de coleta de amostras.....	46
3.2 Métodos de análise	51
3.2.1 Análise petrográfica.....	51
3.2.2 Análise química e de identificação de minerais	75
3.2.3 Análises para caracterização tecnológica	76
4. RESULTADOS DAS ANÁLISES	82
4.1 Resultados da análise petrográfica	82
4.1.1 Folhelho, Paraopeba-MG	83
4.1.2 Granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto, Sabará-MG	90
4.1.3 Granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, Passagem de Mariana-MG	97
4.1.4 Estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, Araçuaí-MG	104

4.1.5 Cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, Itinga-MG.....	111
4.1.6 Xisto verde, Caeté-MG.....	118
4.1.7 Xisto ultramáfico, Serro-MG.....	127
4.2 Caracterização de rochas e identificação de fases minerais - resultados de análises	134
4.2.1 Caracterização via análise química de rocha total.....	134
4.2.2 Identificação de fases minerais por difração de raios X.....	137
4.3 Resultados da caracterização tecnológica.....	138
4.3.1 Índices físicos	138
4.3.2 Avaliação do desgaste por abrasão	141
4.3.3 Avaliação da dilatação térmica linear.....	144
4.3.4 Avaliação da resistência à compressão uniaxial.....	147
4.3.5 Avaliação da resistência à flexão	149
5. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	151
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	162
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169

Índice de Figuras

<i>Figura 1.1 – Gráfico com áreas requeridas para substância “xisto”, no estado de Minas Gerais. Fonte de dados: Cadastro Mineiro-DNPM. Consulta realizada em dezembro de 2011, no endereço <https://sistemas.dnpm.gov.br/SCM/Extra/site/admin/pesquisarProcessos.aspx>.</i>	2
<i>Figura 2.1 – Basílica de San Salvatore dei Fieschi, Cogorno, província de Gênova, Itália. Fotografia capturada em novembro-2008.</i>	6
<i>Figura 2.2 – Basílica de San Salvatore dei Fieschi, Cogorno, província de Gênova, Itália: (a) detalhe dos capiteis das colunas que emolduram a portada principal; (b) pequenas esculturas em baixo-relevo executadas em ardósia e mármore branco, nas bordas dos telhados laterais da fachada principal e (c) escultura no muro que cerca a igreja. Fotografias capturadas em novembro-2008.</i>	7
<i>Figura 2.3 – Basílica de San Salvatore dei Fieschi, Cogorno, província de Gênova, Itália: túmulo, localizado na lateral da nave, com arco paramentado em ardósia e mármore branco. Piso e paredes em ardósia. Fotografia capturada em novembro-2008.</i>	8
<i>Figura 2.4 - Conjunto arquitetônico da Praça Minas Gerais, na cidade de Mariana (MG), composto pelas igrejas de São Francisco (à esquerda) e Nossa Senhora do Carmo (ao centro) e pela Casa de Câmara e Cadeia (à direita). Fotografia capturada em janeiro-2011 (autor: Oscar Cândido, Wikipédia Commons).</i>	9
<i>Figura 2.5 - Igreja Nossa Senhora do Carmo em Mariana-MG. Fotografia capturada em setembro-2010.</i>	10
<i>Figura 2.6 - Igreja Nossa Senhora do Carmo, em Mariana-MG: ombreira em cianita xisto da portada principal. Fotografia capturada em setembro-2010.</i>	11
<i>Figura 2.7 - Igreja São Francisco de Assis, em Mariana-MG: (a) vista da fachada principal com quartzito, pedraltco e cianita xisto e (b) mureta do adro elaborada com cianita xisto. Fotografias capturadas em setembro-2010.</i>	12
<i>Figura 2.8 - Casa de Câmara e Cadeia, em Mariana-MG. Fotografia capturada em setembro-2010.</i>	13
<i>Figura 2.9 - Casa de Câmara e Cadeia, em Mariana-MG: (a) arranque da escadaria de acesso ao 2º piso, esculpido em cianita xisto e (b) detalhe dos cristais orientados de cianita. Fotografia capturada em setembro-2010.</i>	14
<i>Figura 2.10 - Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso, em Caeté-MG: vista da fachada principal. Fotografia capturada em junho-2010.</i>	16
<i>Figura 2.11 - Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso, em Caeté-MG: ombreiras e verga da portada esculpidas em xisto verde e base em quartzito. Fotografia capturada em junho-2010.</i>	17
<i>Figura 2.12 - Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso, em Caeté-MG: (a) detalhe da ombreira da porta principal esculpida em xistos verdes com finas bandas claras e clorita xistos, com aspecto mais fino e homogêneo, fotografia capturada em junho-2010; (b) ilustração do elemento decorativo (Ávila et al., 1979).</i>	18
<i>Figura 2.13 - Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso em Caeté-MG: ombreiras da portada. Fotografias capturadas em junho-2010.</i>	19
<i>Figura 2.14 - Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso em Caeté-MG: pilares que sustentam o coro, na entrada na nave, construídos em xisto verde sobre base de quartzito. Fotografia capturada em junho-2010.</i>	20

<i>Figura 2.15 - Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso em Caeté-MG: pilares que sustentam o coro, com pia de água-benta ao centro. O escalímetro usado na fotografia tem 15 cm de comprimento. Fotografia capturada em junho-2010.</i>	21
<i>Figura 2.16 – Igreja Matriz Nossa Senhora de Bonsucesso: porta lateral na nave da igreja. Fotografia capturada em junho-2010.</i>	22
<i>Figura 2.17 – Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso, Caeté, MG: escada de acesso ao altar-mor, com (a) frente e (b) lateral executadas sem emendas, em xisto com bandamento definido pela alternância de bandas quartzo-cloríticos e bandas carbonáticas. Fotografia capturada em junho-2010.</i>	23
<i>Figura 2.18 - Matriz de Nossa Senhora de Bonsucesso, Caeté-MG: (a) arco-cruzeiro, fotografia capturada em junho de 2010 e (b) ilustração dos principais elementos das pilastras que o sustentam (Ávila et al., 1979).</i>	24
<i>Figura 2.19 – Igreja Matriz Nossa Senhora de Bonsucesso, Caeté-MG: (a) piso de entrada com lajões de quartzito e xisto verde, (b) piso da nave, com tábuas e xisto verde; (c) piso da sacristia, lajeado de pedras com placas de xisto intercaladas a de quartzito. Fotografias capturadas em junho de 2010.</i>	25
<i>Figura 2.20 - Chácara do Barão do Serro, em Serro-MG - vista panorâmica. Fotografia capturada em maio de 2008, durante processo de restauro, realizado pelo projeto Monumenta.</i>	27
<i>Figura 2.21 - Chácara do Barão do Serro, Serro-MG: (a) vista lateral da fachada, com escada de acesso oeste à varanda e guarda-corpo adornado por balaústres em carbonato-talco xisto; (b) escada de acesso leste. Fotografias capturadas em maio-2008.</i>	28
<i>Figura 2.22 - Chácara do Barão do Serro, Serro-MG: balaústres esculpidos em carbonato-talco xisto, localizados no acesso à varanda: (a) balaústre externo com grau de decaimento severo e (b) balaústre interno com decaimento ligeiro. Fotografias capturadas em maio de 2008.</i>	29
<i>Figura 2.23 - Chácara do Barão do Serro -Serro-MG: (a) conjunto de poltronas esculpidas em carbonato-talco-xisto, localizado na varanda principal da antiga residência; (b) poltrona onde se observa a presença de bandas claras e braço quebrado colado com argamassa. Fotografias capturadas em maio-2008.</i>	30
<i>Figura 2.24 - Chácara do Barão do Serro, Serro-MG: fogão à lenha construído em carbonato-talco xisto. Fotografia capturada em maio de 2008, durante processo de restauro conduzido pelo projeto Monumenta.</i>	31
<i>Figura 2.25 - Abaulamento do piso devido a desgaste por abrasão dos pés, em passeio público feito em carbonato-talco xisto. Praça João Pinheiro, Serro-MG. Fotografia capturada em maio de 2008.</i>	31
<i>Figura 3.1 - Províncias Estruturais Brasileiras no estado de Minas Gerais (modificado de Bizzi et. al, 2003).</i>	33
<i>Figura 3.2 - Mapa geológico simplificado do Cráton do São Francisco: retângulos pretos delimitam as regiões onde foram coletadas amostras de rochas xistosas com potencial para rochas ornamentais (modificado de Bizzi et al., 2003).</i>	34
<i>Figura 3.3 - Aspecto macroscópico das rochas selecionadas: (a) folhelho (“ardósia cinza”) do Grupo Bambuí, segmento centro-sul do Cráton do São Francisco, coletado próximo à cidade de Paraopeba; (b) ardósia negra da região da Ligúria (Itália), coletada próxima à cidade de Orero; (c-d) xistos peraluminosos do Grupo Sabará, no Quadrilátero Ferrífero, porção sul do Cráton do São Francisco, coletados próximo às cidades de Sabará e Mariana; (e-f) xistos peraluminosos do Grupo Macaúbas, setor norte da Faixa Araçuaí, coletados próximo às cidades de Araçuaí e Itinga. Recortes de fotografias de chapas com 5 cm², serradas e não polidas.</i>	36

<i>Figura 3.4 - Aspecto macroscópico das rochas selecionadas: (a) xisto verde do Grupo Nova Lima, no Quadrilátero Ferrífero, porção sul do Cráton do São Francisco, coletado entre a cidade de Caeté e Sabará e (b) xisto ultramáfico da Sequencia Serro, Serra do Espinhaço Meridional, coletado próximo à cidade de Serro. Recortes de fotografias de chapas com 5 cm², serradas e não polidas.</i>	36
<i>Figura 3.5 - Recorte do mapa geológico do estado de Minas Gerais (1:1.000.000) na porção sul do Grupo Bambuí (COMIG, 2003), com posição projetada no mapa esquemático do Cráton do São Francisco (Bizzi et al., 2003).</i>	38
<i>Figura 3.6 - Recorte do mapa geológico do estado de Minas Gerais (1: 1.000.000) na região do Quadrilátero Ferrífero (COMIG, 2003), com sua posição projetada no mapa esquemático do Cráton do São Francisco (Bizzi et al., 2003).</i>	40
<i>Figura 3.7 - Recorte do mapa geológico do estado de Minas Gerais (1: 1.000.000) na região da Serra do Espinhaço Meridional (COMIG, 2003), com sua posição projetada no mapa esquemático do Cráton do São Francisco (Bizzi et al., 2003).</i>	43
<i>Figura 3.8 - Recorte do mapa geológico do estado de Minas Gerais (1: 1.000.000) no setor norte da Faixa Araçuaí (COMIG, 2003), com sua posição projetada no mapa esquemático do Cráton do São Francisco (Bizzi et al., 2003).</i>	45
<i>Figura 3.9 - Localização das áreas de coleta de materiais no estado de Minas Gerais.</i>	46
<i>Figura 3.10 - Ponto de coleta de xisto peraluminoso com granada e estauroilita do Grupo Sabará, próximo à cidade de Sabará-MG. Coordenadas Latitude 19°52'47"S, Longitude 43°49'55"O.</i>	47
<i>Figura 3.11 - Bloco de cianita xisto em Passagem de Mariana-MG, próximo ao local de coleta das amostras: (a) marcas de entalhe por ferramentas; (b) no detalhe, cristais orientados milimétricos de cianita, ampliados no quadro à direita. Coordenadas Latitude 20° 24'33"S, Longitude 43°26'24"O.</i>	48
<i>Figura 3.12- Local de amostragem do estauroilita-granada-mica xisto, pedreira nos arredores de Araçuaí-MG. Coordenadas Latitude 16°49'36"S, Longitude 42°03'36"O. Fotografia capturada em fevereiro-2008.</i>	48
<i>Figura 3.13 – Local de amostragem do cordierita-andaluzita-mica xisto, em pedreira próxima à cidade de Itinga-MG. Coordenadas Latitude 16°38'40"S, Longitude 41°50'39"O.</i>	49
<i>Figura 3.14 - Local de coleta de amostras do xisto verde, próximo à cidade de Caeté, em talude da Ferrovia EFVM. Coordenadas Latitude 19°55'47"S, Longitude 43°40'43"O.</i>	50
<i>Figura 3.15 – Local de coleta de amostras do carbonato-talco xisto, em depósito do Morro do Cruzeiro, pedreira desativada de cromitito, localizada nos arredores da cidade do Serro-MG. Coordenadas Latitude 18°35'49"S, Longitude 43°22'47"O.</i>	50
<i>Figura 3.16 - Microscópio Eletrônico de Varredura com canhão de emissão por efeito de campo modelo Quanta 200 - FEG - FEI - 2006, do Centro de Microscopia da UFMG (Fonte: http://www.ufmg.br/microscopia/images/stories/images/quanta_200feg.jpg capturada em 2011-07-12).</i>	53
<i>Figura 3.17 - Imagem de varredura eletrônica por BSE, em seção polida não metalizada de xisto coletado próximo à cidade de Araçuaí (NE de Minas Gerais).</i>	55
<i>Figura 3.18 - Gráfico de variação do coeficiente de emissão η com o número atômico (Heinrich, 1966 apud: Meliska, 2004).</i>	56

- Figura 3.19 - Imagens de seção polida de folhelho no MEV: mapas de EDS, magnificação de 4000x, 58 μm x 74 μm , com os níveis de intensidade dos elementos Fe (a) e Al (b); mapa de cristais de clorita detectados pela combinação dos mapas de elementos químicos Fe e Al (c). _____ 57
- Figura 3.20 - Imagem de seção polida de folhelho no MEV: mapa do elemento Ca por EDS, representado em vermelho, sobreposto à imagem de elétrons secundários (SE), magnificação de 100x, área de 2973 μm por 2323 μm . _____ 57
- Figura 3.21 - Leituras no MEV de seção polida de folhelho: imagem de BSE, magnificação de 1000x, 140 μm x 140 μm (a) e detalhe da mesma região com minerais quartzo-Qtz, moscovita-Mica, clorita-Clo e titanita-Tit identificados em vermelho (b); espectros de leituras por energia dispersiva EDS com picos dos elementos constituintes do quartzo (c); moscovita (d); clorita (e) e titanita (f). _____ 59
- Figura 3.22 - Imagens classificadas das fases minerais quartzo (a); moscovita (b) e clorita (c) a partir de imagem capturada no MEV/BSE, com os respectivos histogramas de intensidade dos pixels. _____ 60
- Figura 3.23 - Fotomicrografias em nicóis cruzados: xistos peraluminosos do Quadrilátero Ferrífero, coletados próximo às cidades de (a) Sabará e (b) Mariana; xistos peraluminosos da região do Médio Jequitinhonha, coletados próximo às cidades de (c) Araçuaí e (d) Itinga; (e) xisto verde do Quadrilátero Ferrífero, coletado próximo à cidade de Caeté; (f) xisto ultramáfico da região da Serra do Espinhaço Meridional, coletado próximo à cidade de Serro. _____ 61
- Figura 3.24 - Imagens de chapas de rochas com feições macroscópicas: (a) fotografia de chapa de 30 x 30 cm onde foram traçados limites de porfiroblastos de andaluzita (linhas azuis) e de cordierita (linhas rosa); (b) imagens resultantes da seleção dos porfiroblastos de andaluzita e (c) e cordierita; (d) imagem capturada no scanner, detalhe de área de 3 x 3 cm, com nódulos (linhas azuis) e granada (linha rosa); (e) imagens resultantes da seleção dos nódulos e (f) da granada. Nas imagens iniciais (a e d), há objetos que não foram marcados, para favorecer a observação. _____ 62
- Figura 3.25 - Etapas de segmentação de fotomicrografias: (a) detalhe de imagens de xisto peraluminoso, objetiva de 2,5x, nicóis cruzados e (b) nicóis descruzados; (c) etapa 1- segmentação em nicóis descruzados com separação de imagens de biotita e (d) quartzo, (e) etapa 2- segmentação em nicóis cruzados por projeção de imagens da etapa1 de biotita e (f) quartzo; (g) etapa 3- definição de cristais individuais de biotita e (h) quartzo. _____ 66
- Figura 3.26 - Detalhe de fotomicrografias com (a) cristais de biotita e quartzo em nicóis descruzados e (b) nicóis cruzados; (c) cristais de clorita, moscovita e quartzo em nicóis descruzados e (d) nicóis cruzados. _____ 67
- Figura 3.27 - Imagem classificada automaticamente com as fases minerais conforme legenda, xisto verde da região da cidade de Caeté. _____ 68
- Figura 3.28 - Limites de cristais desenhados sobre fotomicrografia de xisto ultramáfico da região da cidade do Serro. _____ 69
- Figura 3.29 - Ilustração do sistema Matlab® dos eixos e orientação da elipse, com (a) os pixels do objeto representados em branco e sua elipse correspondente em vermelho e (b) a mesma elipse com feições representadas graficamente: linhas azuis são os eixos, pontos vermelhos são os focos e a orientação é o ângulo entre linha horizontal pontilhada e o eixo maior. _____ 70

Figura 3.30 - Ilustração esquemática dos critérios de classificação para os tipos de cristais quanto ao alongamento, onde os números representados são os limites da razão de alongamento entre as classes (modificado de Takehara,2004).	71
Figura 3.31 - Etapas de preparação de uma imagem para o cálculo de parâmetros geométricos: (a) imagem classificada em fases minerais; (b) imagem com cristais individualizados; (c) imagem binarizada, ainda com a presença de objetos muito pequenos e buracos; (d) imagem com pequenos objetos removidos; (e) imagem final com resultado do fechamento de buracos dentro de cada cristal; (f) mesma imagem com o parâmetro geométrico “orientação” exibido em vermelho (valor em graus).	72
Figura 3.32 - Telas do sistema Quantikov, com procedimentos para medições de parâmetros geométricos: (a) quantificação automática de parâmetros em uma imagem binária, a tela menor à esquerda exibe os resultados; (b) módulo que permite a realização de medidas de distância em segmentos criados manualmente, representados por traços azuis e vermelhos na tela. Os resultados das medições aparecem na lista à direita da tela.	73
Figura 3.33 - Tipos de contatos entre grãos: (a) contato reto; (b) contato curvo; (c) contato interlobado; (d) contato serrilhado (Spry, 1986).	74
Figura 3.34 - Fotomicrografia com exemplos de contatos entre cristais.	74
Figura 3.35 - Esquema do equipamento para ensaio de determinação do desgaste por abrasão, segundo norma NBR 12042 (ABNT,1992).	77
Figura 3.36 - Esquema de disposição do corpo de prova para o ensaio de resistência à flexão, conforme apresentado na norma NBR 15845 Anexo F (ABNT,2010).	80
Figura 4.1 - Folhelho: aspecto macroscópico. Rocha denominada comercialmente como ardósia cinza.	83
Figura 4.2 - Folhelho: imagens de seções polidas, capturadas por MEV-BSE, no Centro de Microscopia da UFMG: (a) palhetas de clorita e moscovita e grãos de quartzo e, no centro da imagem, um cristal de apatita com tamanho de 8 μm , magnificação 8000x; (b) bandamento e um cristal de calcopirita (CuFeS_2), magnificação 100x.	84
Figura 4.3 - Folhelho: imagem de seção polida, capturada por MEV-BSE, no Centro de Microscopia da UFMG: disposição preferencial de clorita e moscovita, magnificação de 1500x. Seção polida cortada perpendicularmente à foliação.	84
Figura 4.4 - Fotomicrografias de folhelho, coletado próximo a Paraopeba-MG: aspecto geral da rocha, com bandamento composicional e granulométrico (a) nicóis descruzados e (b) cruzados; palhetas de clorita, nicóis (c) descruzados e (d) cruzados; bandas claras com cristais maiores de quartzo e moscovita, nicóis (e) descruzados e (f) nicóis cruzados; palheta de moscovita, nicóis (g) descruzados e (h) cruzados.	85
Figura 4.5 - Folhelho, coletado próximo a Paraopeba-MG: (a) aspecto geral da rocha, 1000x, imagem de BSE; (b) sumário gráfico onde a mediana está representada na faixa central da caixa e os valores anômalos representados por asteriscos (*); (c) gráfico de barras a 100% com os minerais classificados quanto ao alongamento; (d) diagrama polar com orientação dos minerais no plano de foliação e (e) diagrama polar com orientação dos minerais no plano perpendicular à foliação.	87
Figura 4.6 - Folhelho coletado próximo a Paraopeba-MG: imagem de cristais de quartzo individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).	88

<i>Figura 4.7 - Folhelho, coletado na região de Paraopeba-MG: imagem de cristais de clorita e moscovita individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).</i>	89
<i>Figura 4.8- Granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto: aspecto macroscópico, onde se observa a presença de bandas mais claras alternadas a bandas escuras. A amostra foi molhada para melhor visualização das estruturas.</i>	90
<i>Figura 4.9 – Fotomicrografias de granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto, coletado próximo a Sabará-MG: (a) aspecto geral da rocha, nicóis descruzados; (b) cristais de estaurolita orientados segundo a foliação, nicóis descruzados; (c) disposição das palhetas de micas e cristais de quartzo, nicóis cruzados; (d) cristais maiores de quartzo com contatos curvos a interlobados e palhetas de moscovita, nicóis cruzados; (e) cristal de granada contornado pela foliação, nicóis descruzados e (f) nicóis cruzados.</i>	92
<i>Figura 4.10 - Granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto, coletado próximo a Sabará-MG: (a) aspecto geral da rocha, 25x, nicóis cruzados e (b) nicóis descruzados; (c) sumário gráfico com a distribuição central e mediana na caixa e valores anômalos representados por asteriscos; (d) gráfico de barras a 100% com os minerais classificados quanto ao alongamento; (e) diagrama polar com orientação dos minerais no plano de foliação.</i>	94
<i>Figura 4.11 - Granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto: imagem de cristais de quartzo individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).</i>	95
<i>Figura 4.12 - Granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto: imagem de cristais de filossilicatos (clorita e moscovita) individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).</i>	96
<i>Figura 4.13 - Granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto: aspecto macroscópico. Fotografia capturada em afloramento próximo à localidade de Passagem de Mariana-MG, onde se observam cristais milimétricos de cianita, com coloração mais escura e relevo mais alto em relação ao restante da rocha.</i>	97
<i>Figura 4.14 – Fotomicrografias de granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, coletado próximo a Passagem de Mariana: Aspecto geral da rocha com cristais de cianita e granada, (a) nicóis descruzados e (b) cruzados; (c) fragmento de filita crenulado em nicóis descruzados e (d) cruzados; (e) cristal de granada com inclusões de quartzo e contornado pela foliação, bordejado por palhetas de moscovita e associada com cristal de cianita e palheta de clorita, com coloração verde bem definida, nicóis descruzados e (f) cruzados.</i>	99
<i>Figura 4.15 - Granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, coletado próximo a Passagem de Mariana-MG: (a) aspecto geral da rocha, 25x, nicóis cruzados e (b) descruzados; (c) sumário gráfico com a distribuição central e mediana na caixa e valores anômalos representados por asteriscos (*); (d) gráfico de barras a 100% com minerais classificados quanto ao alongamento; (e) diagrama polar com orientação dos minerais no plano de foliação.</i>	101
<i>Figura 4.16 - Granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo-xisto: (a) imagem de cristais de quartzo individualizados; (b) histograma da razão de alongamento; (c) histograma do tamanho dos cristais.</i>	102
<i>Figura 4.17 - Granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo-xisto: (a) imagem de cristais de clorita e moscovita individualizados; (b) histograma da razão de alongamento; (c) histograma do tamanho dos cristais.</i>	103

Figura 4.18 - Estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto: aspecto macroscópico, onde se observa a presença de bandas mais claras alternadas a bandas escuras. Material coletado em pedreira localizada próximo à cidade de Araçuaí-MG. _____ 104

Figura 4.19 - Fotomicrografias de estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo a Araçuaí-MG: (a) aspecto geral da rocha com discreto bandamento granulométrico e composicional, nicóis cruzados; (b) nódulo com palhetas orientadas de clorita com maior concentração nas bordas, nicóis cruzados; (c) nódulos milimétricos de quartzo+clorita e bordas de biotita e cristal de granada, nicóis descruzados e (d) nicóis cruzados; (e) cristal de estaurolita e cristais de biotita na forma de palhetas orientadas segundo a foliação e blastos maiores, nicóis descruzados; (f) aspecto da matriz com finos grãos de quartzo, palhetas de biotita, grãos de minerais opacos e palhetas mais finas de moscovita, nicóis cruzados. _____ 106

Figura 4.20 - Estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo a Araçuaí-MG: (a) aspecto geral da rocha, 25x, nicóis cruzados (a) e (b) descruzados; (c) sumário gráfico com distribuição central e mediana na caixa e valores anômalos representados por asteriscos (*); (d) gráfico de barras a 100% com minerais classificados quanto ao alongamento; (e) diagrama polar com orientação dos minerais no plano de foliação. _____ 108

Figura 4.21 - Estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto: (a) imagem de cristais de quartzo individualizados; (b) histograma da razão de alongamento; (c) histograma do tamanho dos cristais. _____ 109

Figura 4.22- Estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto: (a) imagem de cristais de filossilicatos biotita 1 (menor), biotita 2 (maior) e clorita; (b) histogramas da razão de alongamento; (c) histogramas dos tamanhos dos cristais. _____ 110

Figura 4.23 - Cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto: aspecto macroscópico de chapa com acabamento escovado (a) e detalhe do mesmo material (b), nome comercial “Matrix”. Catálogo de produtos da empresa Serraria de Mármore Santo Antônio Ltda., ano: 2008. _____ 111

Figura 4.24 - Fotomicrografias de cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo a Itinga-MG: (a) aspecto geral da rocha onde se observam bandas com maior concentração de biotita e bandas de quartzo, nicóis descruzados; (b) aspecto textural da rocha, mostrando as palhetas orientadas de biotita e a variação de forma e tamanho dos grãos de quartzo, nicóis cruzados; (c) porfiroblasto de andaluzita orientado segundo a foliação, nicóis cruzados; (d) detalhe do porfiroblasto de andaluzita com inclusões de quartzo e biotita, nicóis cruzados; (e) porfiroblasto de cordierita (centro da foto) e palhetas de moscovita transversais à foliação (esquerda), nicóis descruzados; e (f) mesmo local, com nicóis cruzados. _____ 113

Figura 4.25 - Cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo a Itinga-MG: (a) aspecto geral da rocha, 25x, nicóis cruzados e (b) descruzados; (c) sumário gráfico com distribuição central e mediana na caixa e valores anômalos representados por asteriscos (*); (d) gráfico de barras a 100% com minerais classificados quanto ao alongamento; (e); diagrama polar com orientação dos minerais no plano de foliação. _____ 115

Figura 4.26 - Cordierita-andaluzita-biotita-quartzo xisto: (a) imagem de cristais de quartzo individualizados; (b) histograma da razão de alongamento; (c) diagrama polar com orientação dos cristais alongados; (d) histograma do tamanho dos cristais. _____ 116

Figura 4.27 - Cordierita-andaluzita-biotita-quartzo xisto: (a) imagem de cristais de biotita individualizados; (b) histograma da razão de alongamento; (c) histograma do tamanho dos cristais.	117
Figura 4.28 - Albita-carbonato-clorita-quartzo xisto: aspecto macroscópico onde podem ser observados os filmes de material carbonáticos. Amostra coletada entre as cidades de Caeté-MG e Sabará-MG.	118
Figura 4.29 - Fotomicrografias do albita-carbonato-clorita-quartzo xisto, coletado próximo a Caeté-MG: (a) aspecto geral da rocha, nicóis descruzados; (b) presença de níveis carbonáticos, nicóis cruzados; (c) pirita com bordas de clorita, nicóis descruzados e (d) cruzados; (e) cristais de albita maclados, nicóis descruzados e (f) cruzados; (g) biotita, nicóis descruzados e (h) cruzados.	120
Figura 4.30 - Albita-carbonato-clorita-quartzo xisto, coletado próximo a Caeté-MG: (a) aspecto geral da rocha, 25x, nicóis cruzados e (b) descruzados; (c); sumário gráfico com distribuição central e mediana na caixa e valores anômalos representados por asteriscos (*); (d) gráfico de barras a 100% com minerais classificados quanto ao alongamento; (e) diagrama polar com orientação dos minerais no plano de foliação.	122
Figura 4.31 - Albita-carbonato-clorita-quartzo xisto: (a) imagem de cristais de quartzo individualizados; (b) histograma da razão de alongamento; (c) histograma do tamanho dos cristais.	123
Figura 4.32 - Albita-carbonato-clorita-quartzo xisto: (a) imagem de cristais de albita individualizados; (b) histograma da razão de alongamento; (c) histograma do tamanho dos cristais.	124
Figura 4.33 - Albita-carbonato-clorita-quartzo xisto: imagem de cristais de carbonato individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).	125
Figura 4.34 - Albita-carbonato-clorita-quartzo xisto: imagem de cristais de clorita individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).	126
Figura 4.35 - Cromita-clorita-carbonato-talco xisto: aspecto macroscópico da rocha. Fotografia capturada em banco da Praça João Pinheiro, logradouro central na cidade de Serro-MG.	127
Figura 4.36 - Fotomicrografias do cromita-clorita-carbonato-talco xisto, coletado próximo a Serro-MG: (a) aspecto geral da rocha, nicóis descruzados e (b) cruzados; (c) orientação das fibras de talco interligando os cristais de carbonato, nicóis descruzados e (d) cruzados; (e) carbonatos e minerais opacos associados ao talco, nicóis descruzados e (f) cruzados.	129
Figura 4.37 - Cromita-clorita-carbonato-talco xisto, coletado próximo a Serro-MG: (a) aspecto geral da rocha, 25x, nicóis cruzados e (b) descruzados; (c) sumário gráfico com a distribuição central e mediana na caixa e valores anômalos representados por asteriscos (*); (d) gráfico de barras a 100% com minerais classificados quanto ao alongamento; (e) diagrama polar com orientação dos minerais no plano de foliação.	131
Figura 4.38 - Cromita-clorita-carbonato-talco xisto: imagem de cristais de carbonato individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).	132
Figura 4.39 - Cromita-clorita-carbonato-talco xisto: imagem de cristais de talco individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).	133
Figura 4.40 - Gráfico do difratômetro de raios X, com os picos das fases minerais presentes nas porções claras do cromita-clorita-carbonato-talco xisto, amostra coletada próximo a Serro-MG.	137
Figura 4.41 - Gráfico de correlação entre porosidade aparente e absorção d'água para as rochas foliadas estudadas.	141

<i>Figura 4.42 - Máquina para ensaio de desgaste tipo Amsler, do Laboratório de Rochas Ornamentais do CPMTC (Instituto de Geociências – UFMG).</i>	141
<i>Figura 4.43 - Máquina para ensaio de dilatação térmica linear, do Laboratório de Rochas Ornamentais do CPMTC (Instituto de Geociências – UFMG).</i>	145
<i>Figura 4.44 - Prensa hidráulica da empresa FORNEY, para ensaios de resistência à compressão (LABTECRochas /CPMTC – Instituto de Geociências – UFMG).</i>	147
<i>Figura 4.45 - Prensa hidráulica da empresa TINIUS OLSEN, modelo H25K-S para ensaios de resistência à flexão (LABTECRochas /CPMTC – IGC – UFMG).</i>	149
<i>Figura 5.1 - Parâmetros geométricos para as rochas foliadas estudadas: histograma polar com lineação mineral; histograma do tamanho de grão dos principais constituintes e do quartzo.</i>	159
<i>Figura 5.2 - Casa de Câmara e Cadeia: (a) arranque da escadaria de acesso ao 2º piso; (b) Igreja São Francisco de Assis: degraus de acesso ao adro, Mariana-MG. Fotografias capturadas em setembro-2010.</i>	160

Índice de Tabelas

<i>Tabela 3.1 - Esquema de polimento final de seções polidas com utilização de lixas ultrafinas, para leitura no microscópio eletrônico de varredura.</i>	54
<i>Tabela 4.1 - Folhelho: Dados estatísticos descritivos para tamanho e razão de alongamento dos principais minerais.</i>	86
<i>Tabela 4.2 - Granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto: dados estatísticos descritivos para tamanho e razão de alongamento dos principais minerais.</i>	93
<i>Tabela 4.3 - Granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto: dados estatísticos descritivos para tamanho e razão de alongamento dos principais minerais.</i>	100
<i>Tabela 4.4 - Estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto: dados estatísticos descritivos para tamanho dos principais minerais.</i>	107
<i>Tabela 4.5 - Cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto: dados estatísticos descritivos para tamanho dos principais minerais.</i>	114
<i>Tabela 4.6 - Dados estatísticos descritivos para tamanho e razão de alongamento dos principais minerais.</i>	121
<i>Tabela 4.7 - Cromita-clorita-carbonato-talco xisto: dados estatísticos descritivos para tamanho e razão de alongamento dos principais minerais.</i>	130
<i>Tabela 4.8 - Resultados de análises químicas de rocha total dos materiais estudados.</i>	135
<i>Tabela 4.9 - Resultados de análises das rochas pelíticas estudadas e valor médio mundial.</i>	136
<i>Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de índices físicos e parâmetros geométricos dos cristais de quartzo (tamanho e coeficiente de variação).</i>	139
<i>Tabela 4.11 - Valores para escala Mohs de dureza dos principais minerais constituintes das rochas estudadas (Deer et al. 1992).</i>	142
<i>Tabela 4.12 - Resultados do ensaio de resistência ao desgaste por abrasão, tamanho e percentual dos cristais de quartzo, porosidade aparente.</i>	143
<i>Tabela 4.13 - Valores de coeficiente de dilatação para as rochas estudadas, com medidas realizadas em corpos-de-prova com eixo paralelo e perpendicular à foliação e diferença de valores entre as duas direções.</i>	146
<i>Tabela 4.14 - Valores de resistência à compressão uniaxial, com medidas realizadas em corpos-de-prova com força aplicada paralela e perpendicular à foliação e anisotropia.</i>	148
<i>Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios de resistência à flexão por três pontos.</i>	150
<i>Tabela 5.1 - Resultados obtidos dos ensaios de caracterização tecnológica para as rochas xistosas estudadas; valores de referência de rochas brasileiras e portuguesas; especificações para rochas de revestimento, conforme proposta de Frazão (2002).</i>	158

Resumo

O estudo estabeleceu a potencialidade de aplicação de um conjunto de rochas foliadas como rochas ornamentais, a partir do levantamento de detalhe de suas características petrográficas e de suas propriedades geomecânicas. O conjunto avaliado é composto por folhelho e xistos peraluminosos, xisto verde e xisto ultramáfico, gerados sob diferentes condições de metamorfismo, no estado de Minas Gerais. Os litotipos estudados tem forte anisotropia planar e são compostos predominantemente por cristais submilimétricos. A medição automática dos parâmetros geométricos dos grãos, com base em processamento digital de imagem, constituiu uma base confiável para a avaliação dos parâmetros texturais e interpretação de sua influência sobre o comportamento geomecânicos das rochas foliadas. Foram avaliadas correlações entre os graus metamórficos, refletidos nas propriedades intrínsecas dessas rochas, como textura e a composição mineralógica, e suas resistências quando submetidas a esforços mecânicos e ação de agentes intempéricos. Os valores e relações entre os parâmetros geomecânicos obtidos corroboram a importância e a contribuição desse trabalho para o conhecimento do comportamento das rochas ornamentais. As avaliações de aplicações de rochas foliadas em edificações históricas, associadas aos parâmetros petrográficos e geomecânicos, obtidos nesse estudo, contêm as informações necessárias para indicar as formas mais adequadas de uso das rochas foliadas e comprovar a sua viabilidade como rochas ornamentais.

Palavras-Chave: 1.Rochas foliadas. 2. Rochas para revestimento. 3. Xistos. 4.Propriedades geomecânicas. 5. Anisotropia.

Abstract

The present study established the potential of applying a set of foliated rocks as building stones, based on description of their petrographic characteristics and geomechanical properties. The evaluated rocks consist of shale and peraluminous schists, ultramafic schist and greenschist, generated under different conditions of metamorphism, in the state of Minas Gerais. These lithotypes have a strong planar anisotropy and are composed primarily of submillimeter crystals. The automatic measurement of geometrical parameters of the grains, based on digital image processing, was a reliable basis for the evaluation of textural parameters and interpretation of its influence on the geomechanical behavior of foliated rocks. The present study investigated the relationship between the metamorphic grades, reflected in the intrinsic properties of these rocks - mineralogical composition and texture, and its resistance when subjected to mechanical stress. The values and relationships between the geomechanical parameters obtained in this study confirm the importance and contribution of this work to the knowledge of building stones. Evaluations of foliated rocks in historic buildings associated with petrographic and geomechanical parameters obtained in this study contain the information necessary to indicate the most appropriate forms of use of foliated rocks and prove its viability as building stone.

Key-Words: 1. Foliated rocks. 2. Building stones. 3. Schists. 4. Geomechanical properties. 5. Anisotropy.

1. INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Rochas ornamentais e para revestimento são tipos litológicos extraídos em blocos ou placas, que podem ser cortados e beneficiados através de esquadrejamento, polimento e lustro (Costa *et al.*, 2000). A qualidade das rochas ornamentais é avaliada por seus aspectos estéticos, pelos índices físico-tecnológicos e por sua resistência à alteração. As características petrográficas, intrínsecas das rochas, influenciam nos aspectos estéticos, em termos de coloração e arranjos texturais e atuam na resistência das rochas frente a esforços mecânicos e processos de alteração intempérica.

Comercialmente as rochas ornamentais são classificadas como mármore, granito, quartzito, xisto e ardósias. Os “granitos” correspondem às rochas silicáticas (ígneas plutônicas ou vulcânicas, gnaisses e migmatitos), os “mármore” às rochas calcárias ou dolomíticas. Segundo dados da Associação Brasileira de Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS (2008), a composição da produção brasileira de rochas ornamentais no ano de 2007 estava dividida em aproximadamente 50% de granitos, 14% mármore, 11% quartzito e 11% de ardósias. Em termos de produção mundial, os granitos e os mármore juntos respondem por 90% do total produzido. As publicações especializadas em rochas ornamentais não fazem referências específicas, quanto ao percentual de rochas xistosas, que compõem o mercado.

Há uma tendência recente para especificação, por parte dos arquitetos e engenheiros, de materiais e formas de acabamento diversos dos tradicionais (Ferrari, 2001), como indica o sumário mineral do DNPM (2005), onde consta, para o ano de 2004, o surgimento de cerca de 100 novos tipos no mercado brasileiro de rochas ornamentais, com destaque especial para materiais com aspecto exótico. De acordo com essa tendência, rochas xistosas, que constituem o objeto de estudo dessa tese, foram muito utilizadas no passado e vêm despertando um interesse crescente do mercado, principalmente por aspectos estéticos peculiares. Levantamento de áreas requeridas no Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), tendo como substância “xisto”, para o estado de Minas Gerais, ilustra esse aumento (Figura 1.1). A consulta foi realizada em dezembro de 2011, no “Cadastro Mineiro”, sistema da Diretoria de Gestão de Títulos Minerários - DGTM, do DNPM, que reúne informações sobre os processos de mineração.

Número de áreas

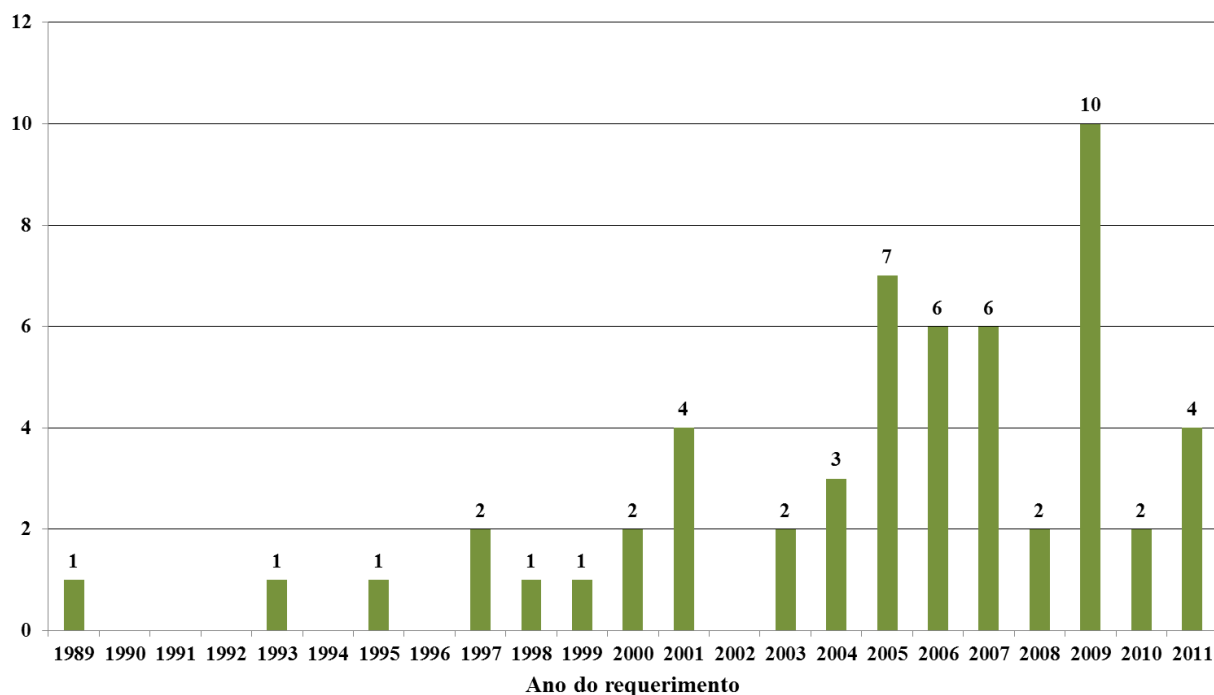


Figura 1.1 – Gráfico com áreas requeridas para substância “xisto”, no estado de Minas Gerais. Fonte de dados: Cadastro Mineiro-DNPM. Consulta realizada em dezembro de 2011, no endereço <<https://sistemas.dnmp.gov.br/SCM/Extra/site/admin/pesquisarProcessos.aspx>>.

Essas rochas xistosas são metamórficas e distinguem-se por sua textura e subordinadamente por sua composição mineralógica. O conhecimento mais amplo de suas características traz como benefício demonstrar seu potencial de utilização como rocha ornamental, permitindo corretas especificações de uso. Segundo Costa *et al.* (2000), a disponibilidade dos dados tecnológicos deve permitir um melhor aproveitamento e aplicações mais adequadas, com agregação de valor a esses materiais pétreos. As diferentes classes de rochas ornamentais exigem o desenvolvimento de estudos específicos, pois relações entre propriedades petrográficas e tecnológicas, encontradas para um determinado litotipo, não necessariamente se reproduzem em outros tipos e precisam ser validadas. A exemplo disso podem ser citadas pesquisas anteriores com rochas graníticas, que encontraram correlações entre aspectos petrográficos e propriedades mecânicas (Tuğrul & Zarif, 1999; Navarro *et al.*, 1999; Navarro & Artur, 2002; Meyer, 2003; Navarro, 2006, entre outros), mas que não se reproduziram em pesquisas com arenitos (Shakoor & Bonelli, 1991) e com dolomitos (Hatzor *et al.*, 1997).

Em termos de pesquisas acadêmicas sistemáticas desenvolvidas no Brasil não foram conduzidos até hoje estudos específicos sobre rochas foliadas, mais especificamente xistos, com abordagem abrangente e ao mesmo tempo detalhada, para a análise do emprego destes materiais como rochas ornamentais. Assim o conhecimento das características próprias dos

xistos e folhelhos, considerando aspectos texturais, composições químicas e mineralógicas, constituem uma contribuição para o estudo de rochas ornamentais.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta tese consiste em, de um conjunto de rochas xistosas, estabelecer sua potencialidade de aplicação como rocha ornamental, por meio da avaliação dos resultados de levantamento de detalhe de suas características petrográficas e de suas propriedades geomecânicas.

A partir dessa caracterização, estabelecer possíveis correlações entre os graus metamórficos, refletidos nas propriedades intrínsecas dessas rochas - textura e a composição mineralógica, e suas resistências quando submetidas a esforços.

Indicar as formas de utilização mais adequadas para essas rochas foliadas, a partir dos dados obtidos em laboratório e em exemplos de aplicações históricas das rochas xistosas.

2. APLICAÇÕES DE ROCHAS XISTOSAS: REFERÊNCIAS PARA A PESQUISA

As aplicações de rochas xistosas em edificações do patrimônio histórico foram, no contexto dessa tese, consideradas como de referência para o estudo proposto, levando-se em conta a idade e a diversidade dos materiais empregados. Por conta disso, elas foram estudadas com a finalidade de demonstrar e justificar seu potencial para utilização como rocha ornamental em projetos arquitetônicos contemporâneos.

Considerando o fato que as rochas se deterioraram pela inter-relação de propriedades intrínsecas e ações externas, sob forte influência do fator tempo, as edificações históricas que contêm elementos em rocha constituem um laboratório natural para a avaliação do comportamento desses materiais, frente aos agentes mecânicos e esforços mecânicos, por um longo período de exposição.

Essas aplicações de rochas xistosas como rocha ornamental remontam aos séculos passados, quando foram extensamente utilizadas, principalmente em edificações dos séculos XVIII e XIX, em Minas Gerais. Segundo Silva (2007), a dificuldade de transporte para o sertão mineiro de pedras como a lioz e a anã portuguesas e o mármore italiano, em conjunto com a disponibilidade de mão de obra escrava para extrair e trabalhar materiais locais, favoreceu a sua utilização. Nas principais cidades históricas de Minas Gerais há exemplos destas aplicações em elementos de cantaria¹, que conferem um aspecto singular ao Barroco Mineiro. O início do século XIX marca o declínio da utilização desses materiais como rochas ornamentais. Segundo Villela (2003), os seguintes fatos foram decisivos para essa mudança: o fim do trabalho escravo, a vinda da corte de D. João VI para o Brasil e a chegada da Missão Francesa, que favoreceu a adoção do estilo neoclássico, com o emprego de novos materiais.

A seleção dos monumentos baseou-se no destaque do uso da rocha foliada nessas construções, seja com funções estruturais, utilitárias ou decorativas. Além desse critério, que se refere à aplicação da rocha em si, buscou-se representar conjuntos composicionais com graus metamórficos distintos. Considerando o fato de que o estudo das aplicações históricas foi realizado com o propósito de ser referência e justificar uma avaliação quanto às aplicações atuais, foram selecionados monumentos para os quais são conhecidas as áreas de onde foram extraídos os materiais utilizados, permitindo assim a coleta de amostras para posterior caracterização tecnológica.

¹ Cantaria é a pedra afeiçãoada manualmente com o uso de ferramentas adequadas e utilizada em construções e equipamentos, como elemento estrutural e/ou ornamentação (Villela, 2003).

Os casos descritos são os seguintes: construções religiosas e civis da arquitetura do período colonial mineiro, construídas no século XVIII, representadas pelo conjunto arquitetônico da Praça Minas Gerais, em Mariana-MG, composto pelas igrejas de São Francisco e Nossa Senhora do Carmo e pela Casa de Câmara e Cadeia; a Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso, em Caeté-MG e uma residência do século XIX: a Chácara do Barão do Serro, em Serro-MG. Todas as edificações constituem-se monumentos tombados pelo patrimônio nacional.

Quanto ao folhelho estudado, com denominação comercial de ardósia cinza, trata-se de rocha com histórias de extração e de comercialização recentes, iniciadas somente a partir da década de 1980, sendo Minas Gerais responsável por mais de 90% da produção nacional (Chiodi Filho, 2011). Exatamente por sua história recente, não foram localizadas edificações ou monumentos com uma singularidade tal que justificasse um estudo de caso. Essa rocha é amplamente empregada em residências particulares e espaços públicos no Brasil.

A ardósia negra, extraída na região da Ligúria (Itália) foi incluída no conjunto de rochas pelíticas consideradas, por ser uma rocha com histórico de extração desde os primórdios do primeiro milênio e com vários exemplos de aplicações em edificações do século XIII. Por ocasião do projeto Alfa Faro, por intermédio da Universidade de Bologna, foram visitadas áreas de extração de ardósia negra e descrito monumento edificado com emprego desse litotipo: a basílica de *San Salvatore dei Fieschi*, edificação religiosa do século XIII, na Itália.

Para cada caso, foi apresentada uma breve contextualização histórica da edificação, seguida pela identificação dos elementos pétreos presentes, descrição dos litotipos e das formas de aplicação.

2.1 EXEMPLOS DE APLICAÇÕES

2.1.1 Basílica de San Salvatore dei Fieschi, Província de Gênova, Ligúria, Itália

Na província de Gênova, região da Ligúria (Itália), a vida cultural e econômica sempre esteve ligada à ardósia desde muitos séculos, conforme análise de Meriana (1990), que faz referência à existência de uma “cultura da *ardesia*”. A ardósia dessa região é descrita como uma pedra negra, com tendência a adquirir coloração cinza depois de exposta à área aberta. Tem como característica principal uma fissilidade marcante segundo um plano de xistosidade bem definido, que permite seu deslocamento em blocos e placas regulares finas, com espessuras que chegam a poucos milímetros (Cortesogno & Mannoni, 1995; Meriana, 1990).

Os telhados das casas nobres, das igrejas e dos edifícios públicos anteriores a 1500, são cobertos em ardósia (Meriana, 1990).

No território de Cogorno, encontra-se um monumento religioso histórico muito significativo para a região de Levante-Ligúria: a basílica de *San Salvatore dei Fieschi*. A família Fieschi foi uma das quatro famílias mais importantes da nobreza feudal de Gênova. O vale *Fontanabuona* foi o centro de seu poder, onde foi construída a *Basilica dei Fieschi*, na metade do século XIII.

Com estilo arquitetônico gótico-romano, semelhante ao de outros edifícios religiosos da Ligúria, a ardósia está presente no telhado e na fachada e foi extraída de pedreiras próximas ao vale de Fontanabuona e ao Monte Santa James. Sobre o arco da portada e na parte superior da fachada, há uma alternância de ardósia e mármore branco (Figura 2.1²).

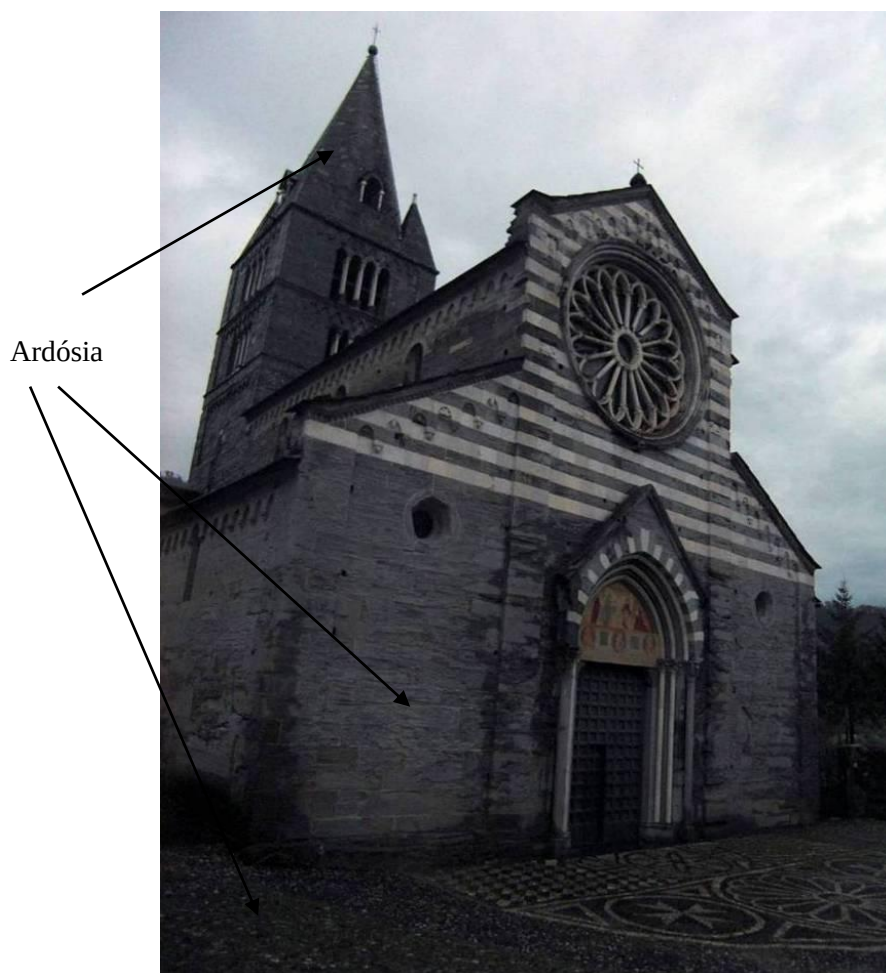


Figura 2.1 – Basílica de *San Salvatore dei Fieschi*, Cogorno, província de Gênova, Itália. Fotografia capturada em novembro-2008.

² Porções mais escuras, observadas principalmente próximas à portada e nas quinas da basílica, são devidas à chuva no momento da captura da fotografia.

As paredes da basílica foram construídas em ardósia e na área externa essa rocha está presente tanto nas estruturas, como em afrescos e elementos decorativos nas pilastras e arcos da portada principal. Os capitéis das colunas que emolduram a portada principal são em ardósia e mármore branco (Figura 2.2.a). Os beirais dos telhados da fachada principal são emoldurados por um rendilhado em forma de pequenos arcos e dentro de cada arco há uma escultura em baixo-relevo executada em ardósia ou mármore branco (Figura 2.2.b). Nos muros em pedra que cercam a basílica há também esculturas em alto-relevo em ardósia (Figura 2.2.c).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.2 – Basílica de San Salvatore dei Fieschi, Cogorno, província de Gênova, Itália: (a) detalhe dos capitéis das colunas que emolduram a portada principal; (b) pequenas esculturas em baixo-relevo executadas em ardósia e mármore branco, nas bordas dos telhados laterais da fachada principal e (c) escultura no muro que cerca a igreja. Fotografias capturadas em novembro-2008.

Considerando que a basílica é uma edificação do século XIII, o estado de conservação da área externa é testemunho do comportamento da ardósia em condições intempéricas. O material mostra uma alteração da coloração, com clareamento para tons de cinza, mas não se observam deteriorações com alguma intensidade em níveis expressivos.

O interior do edifício é constituído por três naves, separadas por uma fileira de colunas de pedra com capitéis decorados. Nas laterais direita e esquerda, próximo à entrada da basílica estão os túmulos da família *Fieschi*, paramentados com arcos com alternância de ardósia e mármore branco (Figura2.3).



Figura 2.3 – Basílica de *San Salvatore dei Fieschi*, Cogorno, província de Gênova, Itália: túmulo, localizado na lateral da nave, com arco paramentado em ardósia e mármore branco. Piso e paredes em ardósia. Fotografia capturada em novembro-2008.

2.1.2 Conjunto arquitetônico da Praça Minas Gerais em Mariana-MG

No centro histórico da cidade de Mariana (MG), foi utilizado um cianita xisto em elementos arquitetônicos de edificações do período entre o século XVIII e início do século XIX. Está presente em diversas formas de aplicações: nas vergas e ombreiras do casario da Rua Direita, na Casa Capitular e em várias igrejas. O xisto pode ser identificado por sua coloração cinza, por vezes azulada, e pela presença de cristais milimétricos de cianita e de fragmentos líticos, em proporções variáveis, orientados segundo a pronunciada foliação.

Por conter em um mesmo espaço urbano exemplos de arquitetura civil e religiosa, onde o xisto foi amplamente empregado, selecionou-se o conjunto arquitetônico da Praça Minas Gerais. Ele é composto pelas igrejas de São Francisco e Nossa Senhora do Carmo e pela Casa de Câmara e Cadeia (Figura 2.4). Segundo Caldeira (1997), embora ambas as igrejas pareçam a princípio similares, elas apresentam diferenças importantes nas torres, número de janelas das fachadas e curvas no pedimento. Enquanto a Igreja de São Francisco tem uma linha de formas geométricas com tendência neoclássica, a igreja do Carmo tem as linhas arredondadas do estilo rococó. Ávila *et al.* (1979) afirmam que as formas curvilíneas e recuadas nos planos das torres a Igreja do Carmo de Mariana são características do estilo barroco-rococó, que corresponde à 3.a fase da arquitetura religiosa em Minas.



Figura 2.4 - Conjunto arquitetônico da Praça Minas Gerais, na cidade de Mariana (MG), composto pelas igrejas de São Francisco (à esquerda) e Nossa Senhora do Carmo (ao centro) e pela Casa de Câmara e Cadeia (à direita). Fotografia capturada em janeiro-2011 (autor: Oscar Cândido, Wikipédia Commons).

O cianita xisto utilizado nas três edificações é proveniente de antigas pedreiras localizadas no entorno de Passagem de Mariana (Costa, 2009), localidade a cerca de 8 km do centro da cidade Mariana-MG.

Igreja Nossa Senhora do Carmo

Na Igreja do Carmo, o cianita xisto foi amplamente utilizado na área externa e interna. Conforme descreve Costa (2009), está presente nas molduras dos vãos, nas portas e portadas, bem como no arco cruzeiro. A distribuição dos tipos de rocha na área externa da igreja está indicada na Figura 2.5.



Figura 2.5 - Igreja Nossa Senhora do Carmo em Mariana-MG. Fotografia capturada em setembro-2010.

A portada tem enquadramento com ombreiras em cianita xisto. Há uma justaposição de peças, com ombreiras internas e externas. As ombreiras internas são construídas em peças únicas, com altura de 2,6 metros da base até a emenda com a verga. Já as ombreiras externas foram construídas em peças onde se observam duas emendas na porção superior, com peças de 2,40 metros e as duas superiores com 15 e 25 centímetros, essa última no contato com a sobreverga. Na Figura 2.6.a estão indicadas com setas as emendas das peças. Na porção inferior da portada estão presentes alterações por destacamento de material com fragmentação em lascas; descamação concordante com a foliação da rocha e depósitos por sujidade (Figura 2.6.b).



Figura 2.6 - Igreja Nossa Senhora do Carmo, em Mariana-MG: ombreira em cianita xisto da portada principal. Fotografia capturada em setembro-2010.

Igreja de São Francisco de Assis, Mariana-MG.

Na Igreja de São Francisco, os quartzitos predominam na fachada. Conforme descreve Costa (2009), as aberturas das torres, os cunhais, embasamento, cimalha e ombreiras da portada são de quartzito e os balaústres da sacada e no medalhão acima da porta principal são de pedra-talco. Os cianita xistos estão presentes nas laterais internas da capela, em conversadeiras (janelas de assento), pias e parapeitos (Costa, 2009) e em elementos estruturais na área externa da edificação, a saber: nos pisos das escadarias que dão acesso ao adro da igreja e no guarda-corpo localizado na lateral da igreja. A Figura 2.7 apresenta a distribuição dos tipos de rocha na área externa da igreja (a) e mureta em cianita xisto, construída com chapas justapostas desse material, algumas alcançando comprimentos na ordem de 4 a 5 metros (b).



(a)



(b)

Figura 2.7 - Igreja São Francisco de Assis, em Mariana-MG: (a) vista da fachada principal com quartzito, pedra-talco e cianita xisto e (b) mureta do adro elaborada com cianita xisto. Fotografias capturadas em setembro-2010.

Casa de Câmara e Cadeia de Mariana

Exemplo de arquitetura civil do período colonial mineiro, a Casa de Câmara e Cadeia de Mariana apresenta, segundo Ávila *et al.* (1979), linhas sóbrias, mas com alguma ênfase do elemento ornamental (Figura 2.8). No relatório sobre sítios históricos e conjuntos urbanos de monumentos nacionais, do projeto Monumenta (MEC-Monumenta, 2005), a edificação de uso público/civil, é apresentada como “um dos exemplares mais curiosos da arquitetura colonial de Mariana, teve sua construção iniciada em 1768, com planta de Arouca, tendo sido concluída trinta anos depois. Juntamente com as Igrejas do Carmo e São Francisco, cujas fachadas estão em ângulo reto, formam um conjunto arquitetônico da Praça João Pinheiro” (MEC-Monumenta, 2005).



Figura 2.8 - Casa de Câmara e Cadeia, em Mariana-MG. Fotografia capturada em setembro-2010.

A escadaria da Câmara apresenta singular trabalho de cantaria com emprego do cianita xisto. Costa (2009) descreve os detalhes e acabamentos dessa estrutura e ressalta sua expressão cenográfica, acentuada pela portada heráldica localizada no final das escadas (Figura 2.8, ao centro, no alto). Os degraus, patamares, corrimão, cunhais e pilares foram todos esculpidos em cianita xistos da região de Passagem de Mariana, sendo que alguns elementos ornamentais, como os arremates dos pilares, são em pedra-sabão. No piso térreo da edificação a entrada das celas é emoldurada por arco lavrado nesse mesmo xisto. Na Figura 2.9.a observa-se o trabalho de entalhe no arranque, parte inicial do corrimão. Na Figura 2.9.b,

detalhe do mesmo elemento decorativo, com cristais orientados de cianita. De forma geral, nos elementos construídos em pedra, que compõem a escadaria, não se observam alterações com nível de intensidade significativo.

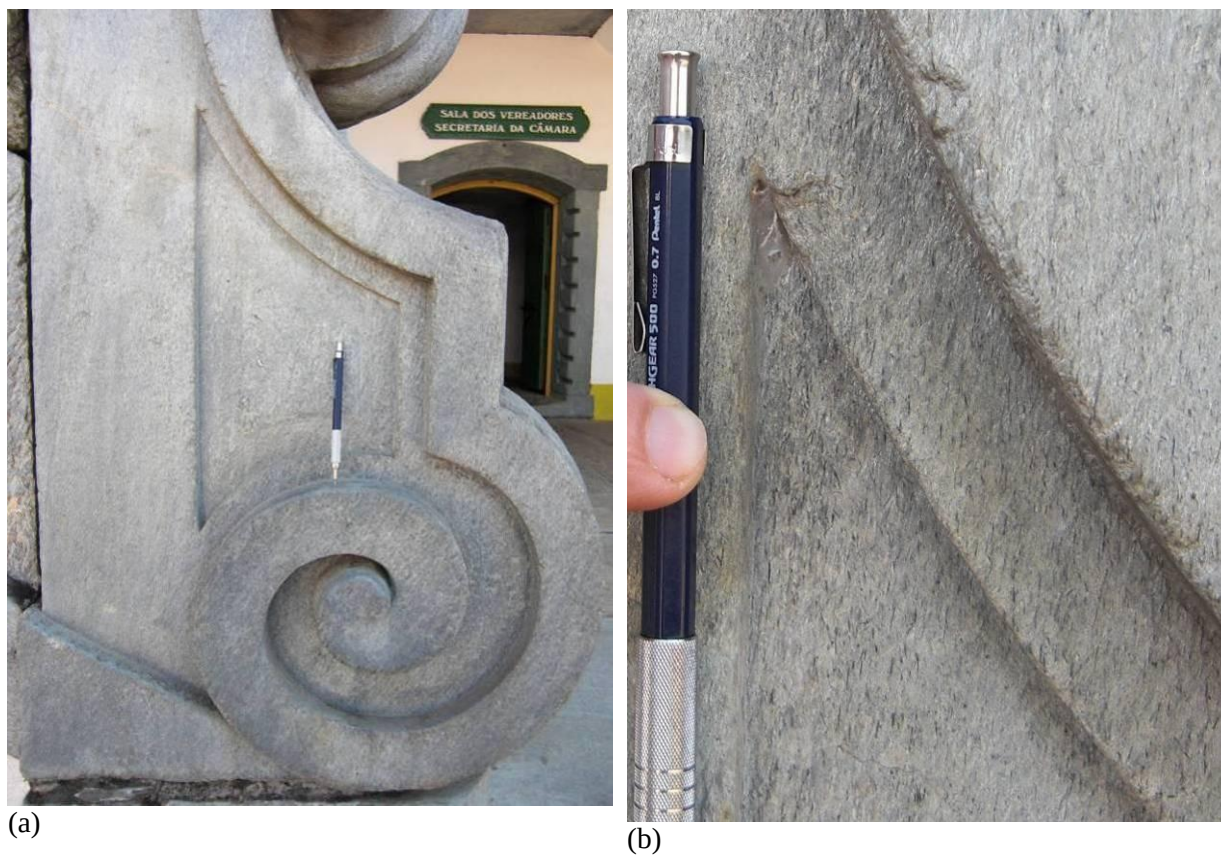


Figura 2.9 - Casa de Câmara e Cadeia, em Mariana-MG: (a) arranque da escadaria de acesso ao 2º piso, esculpido em cianita xisto e (b) detalhe dos cristais orientados de cianita. Fotografia capturada em setembro-2010.

2.1.3 Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso, Caeté-MG

A cidade de Caeté situa-se na região metropolitana de Belo Horizonte, e sua principal referencia paisagística é a Serra da Piedade, localizada a aproximadamente 50 km de Belo Horizonte-MG. No Centro Histórico estão situados monumentos tombados, que registram a opulência da antiga Vila Nova da Rainha do Caeté no século XVIII e formam um conjunto representativo da arquitetura colonial dos séculos XVIII ao XIX (MEC-Monumenta, 2005). Destaca-se nesse conjunto a Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso, edificação histórica com tombamento federal, que se situa em local elevado na praça central da cidade. Foi construída segundo planta projetada por Manoel Francisco Lisboa. Sua construção iniciou-se em 1757 e foi concluída em 1765. Segundo proposta de classificação das construções religiosas do período colonial mineiro, a Igreja Matriz de Nossa Senhora do Bonsucesso representa a segunda fase da evolução dessa arquitetura, caracterizada por estrutura da construção em alvenaria de pedra; frontispício com linhas retangulares, ornamentação interior menos intensa, com prevalência do elemento escultórico, mas já com a presença de elementos ornamentais em cantaria (Ávila *et al.*, 1979). A edificação é composta de nave, capela-mor, corredores laterais e sacristia aos fundos e é apontada como a primeira edificação religiosa mineira construída em pedra (IEPHA, 2009).

A igreja apresenta importante trabalho em cantaria aparente, com quartzito e xisto verde (metabasalto) do grupo Nova Lima, Supergrupo Rio das Velhas. O xisto foi empregado tanto na estrutura como em elementos decorativos, estando presente nos enquadramento dos vãos e nos pilares, cunhais e guarnições do frontão do interior da nave. Na área externa, foi utilizado no enquadramento da portada e no piso de acesso à igreja. Os telhados têm beirado em cimalha, também de cantaria (Figura 2.10).



Figura 2.10 - Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso, em Caeté-MG: vista da fachada principal. Fotografia capturada em junho-2010.

Os elementos escultóricos em xisto verde estão presentes na portada, no conjunto de pilastras que sustentam o coro, nas portas de acesso laterais e no altar. A portada tem enquadramento com ombreiras em xisto verde, construídas em peças únicas sem emenda, com altura aproximada de 4 m. As ombreiras, a verga e a sobreverga apresentam primoroso trabalho escultórico (Figura 2.11). As ombreiras em xisto estão sobre uma base de quartzito.



Figura 2.11 - Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso, em Caeté-MG: ombreiras e verga da portada esculpidas em xisto verde e base em quartzito. Fotografia capturada em junho-2010.

No alto das ombreiras que emolduram a portada, destacam-se ornatos realizados em xisto verde, com detalhes esculpidos em rocha verde escura e mais fina, com aspecto maciço (Figura 2.12.a), constituída predominantemente por clorita (Costa, 2009). Conforme descrito e ilustrado por Ávila *et al.* (1979), o elemento decorativo compõe-se de concha e pano, ornato imitando pano com dobras e pregas, esculpidos no mesmo xisto das ombreiras. Esculpidos no

clorita xisto, mais fino e escuro, os ornatos borla, em forma de campânula, e *chambranle* (Figura 1.12.b). Os detalhes do elemento escultórico demonstram a favorabilidade destas rochas para o processo de entalhe. Expostos às intempéries e construídos no século XVIII, não apresentam sinais aparentes de alteração do material em si, apenas sujidade.

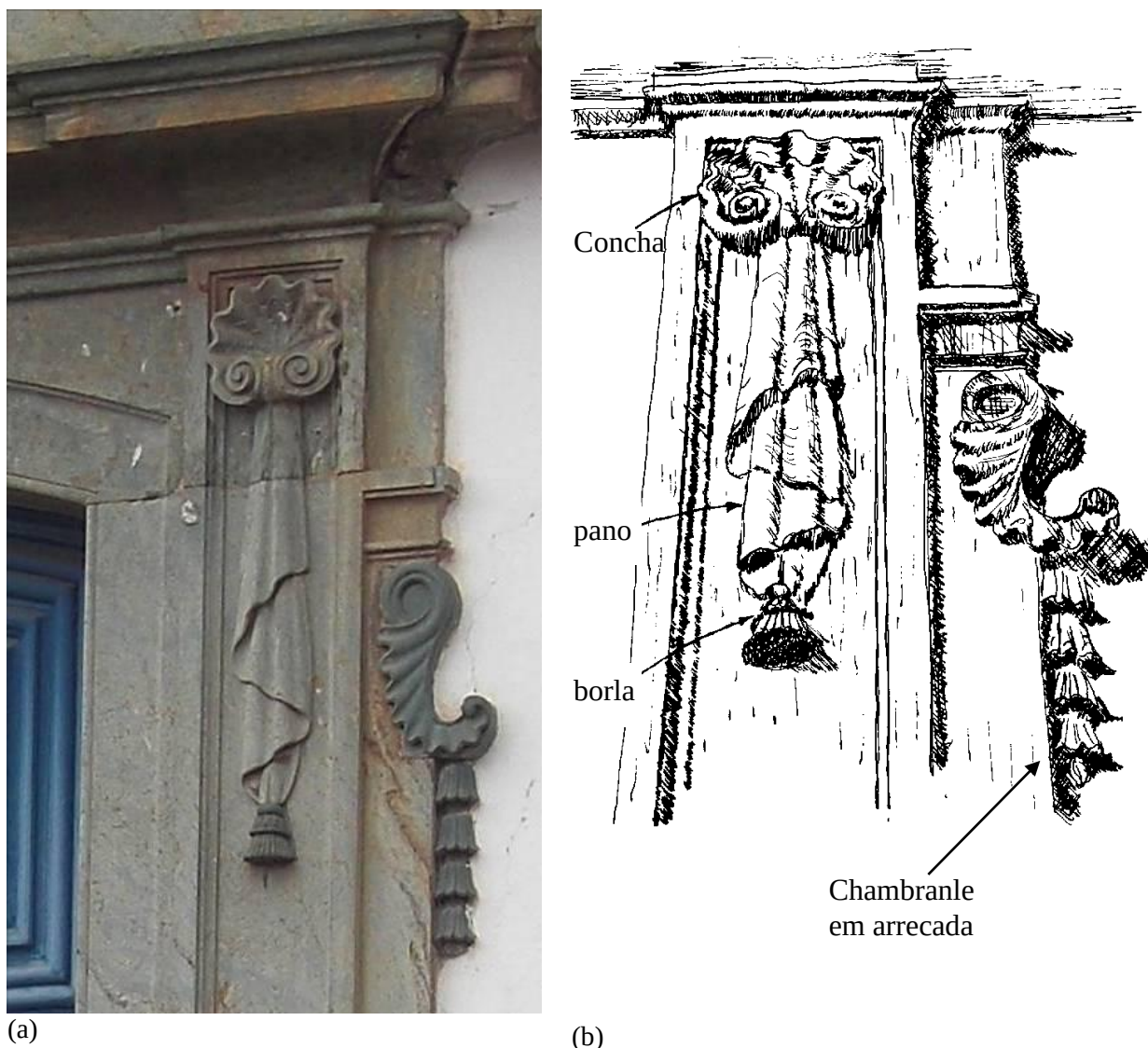


Figura 2.12 - Igreja Matriz Nossa Senhora do Bom Sucesso, em Caeté-MG: (a) detalhe da ombreira da porta principal esculpida em xistos verdes com finas bandas claras e clorita xistos, com aspecto mais fino e homogêneo, fotografia capturada em junho-2010; (b) ilustração do elemento decorativo (Ávila *et al.*, 1979).

Nas ombreiras da Igreja de Bom Sucesso observa-se a foliação do xisto verde, concordante com o sentido de maior comprimento das peças, que se sobrepõem a peças talhadas no mesmo material, com disposição da foliação na horizontal (Figura 2.13). As presenças de cavidades milimétricas a centimétricas registram uma erosão diferenciada com perda de minerais, provavelmente pirita, fase mineral observada macroscopicamente e em seções polidas do mesmo material. Na base da ombreira há uma fragmentação na borda do

bloco de pedra (Figura 2.13). Segundo descrito no glossário de alterações do ICOMOS-ISCS (2008), as partes inferiores ou superiores de colunas monolíticas, como é o caso desta ombreira, estão particularmente sujeitas à fragmentação com lascamento, devido à sobrecarga de um peso grande suportado por uma área pequena. Nas porções inferiores das ombreiras estão presentes processos de deterioração, com manchamento ou sujidade por gordura, entre aproximadamente 120 a 160 cm de altura, que coincidem com a altura das mãos. Observam-se minerais oxidados, provavelmente um Fe-carbonato, que segundo Deer *et al.* (1992), torna-se marrom amarelado ou marrom, quando ocorre a oxidação do ferro. É observada alteração cromática com amarelamento das bandas claras do xisto, provocado pela oxidação do ferro presente (Figura 2.13).



Figura 2.13 - Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso em Caeté-MG: ombreiras da portada. Fotografias capturadas em junho-2010.

Na parte interna da igreja, o xisto está presente nos pilares do coro, nas ombreiras e vergas das portas travessas, nos degraus e paredes laterais da escada de acesso ao altar mor, pisos e no arco cruzeiro.

A estrutura do coro consiste de bases em quartzito, sobrepostas por pias de água-benta, de onde saem de seus centros as pilastras de sustentação. Produzidas no mesmo material das ombreiras da portada principal, as pilastras são peças confeccionadas sem emendas, com

aproximadamente 4 m de altura (Figura 2.14). As pilastras foram cortadas subparalelas à foliação da rocha e suas bases esculpidas também concordantes com a foliação (Figura 2.15). Costa (2009) destaca a singularidade desse conjunto, tanto no aspecto da pia central, como na rocha que a constitui, que “se diferencia pelo corte que ressalta as bandas claras ricas em cristais de carbonato e quartzo”. As peças em xisto verde que compõem a estrutura de sustentação do coro não apresentam alterações visíveis, excetuando-se as bases das pilastras, que apresentam discreta sujidade.



Figura 2.14 - Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso em Caeté-MG: pilares que sustentam o coro, na entrada na nave, construídos em xisto verde sobre base de quartzito. Fotografia capturada em junho-2010.



Figura 2.15 - Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso em Caeté-MG: pilares que sustentam o coro, com pia de água-benta ao centro. O escalímetro usado na fotografia tem 15 cm de comprimento. Fotografia capturada em junho-2010.

Nas ombreiras e vergas das portas laterais da nave da igreja, construídas com xisto verde, destacam-se bandas esbranquiçadas, constituídas por carbonato, quartzo e albita, com espessuras que variam de milimétricas a centimétricas. Em um das portas, as bandas claras destacam-se com um relevo mais alto, conferido pelas diferenças de dureza entre as primeiras em relação às faixas verdes, com presença de clorita em sua composição (Figura 2.16) e, portanto, com menor dureza. Nas bases das ombreiras há feições de alteração com aumento da rugosidade pouco pronunciada. Na altura intermediária das portas, há alteração por sujidade, com manchamento na superfície da rocha com aspecto gorduroso (Figura 2.16).



Figura 2.16 – Igreja Matriz Nossa Senhora de Bonsucesso: porta lateral na nave da igreja. Fotografia capturada em junho-2010.

As laterais que compõem o acesso à capela-mor foram executadas no mesmo xisto verde, em chapas sem emendas, sem alterações mecânicas visíveis (Figura 2.17).



(a)



(b)

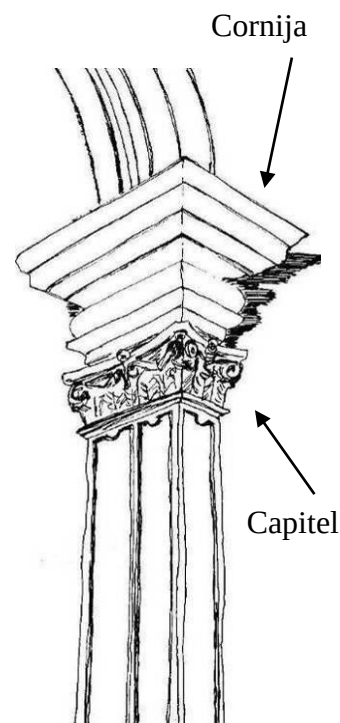
Figura 2.17 – Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso, Caeté, MG: escada de acesso ao altar-mor, com (a) frente e (b) lateral executadas sem emendas, em xisto com bandamento definido pela alternância de bandas quartzo-cloríticos e bandas carbonáticas. Fotografia capturada em junho-2010.

Segundo descreve Costa (2009), as bases e o arco cruzeiro da Igreja de Nossa Senhora do Bonsucesso foram construídos em quartzito e os capitéis e cornijas foram construídas em

xisto verde (Figura 2.18.a). Na Figura 2.18.b, ilustração das pilastras do arco cruzeiro da Igreja de Bonsucesso, por Ávila *et al.* (1979).



(a)



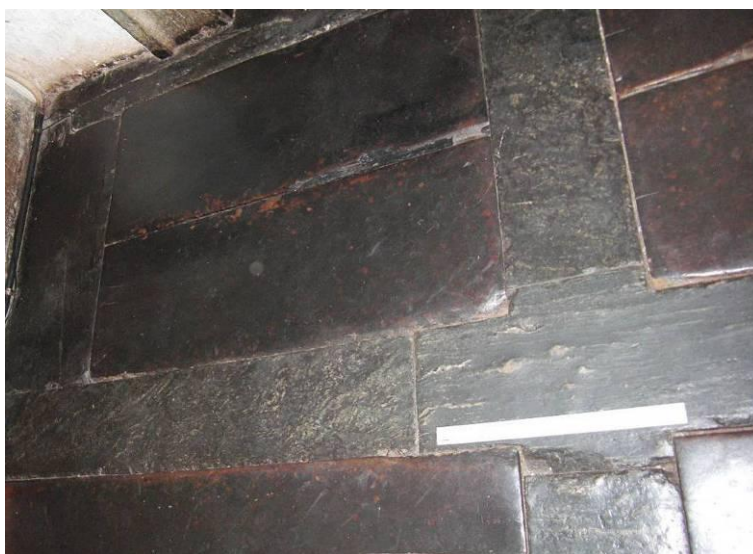
(b)

Figura 2.18 - Matriz de Nossa Senhora de Bonsucesso, Caeté-MG: (a) arco-cruzeiro, fotografia capturada em junho de 2010 e (b) ilustração dos principais elementos das pilastras que o sustentam (Ávila *et al.*, 1979).

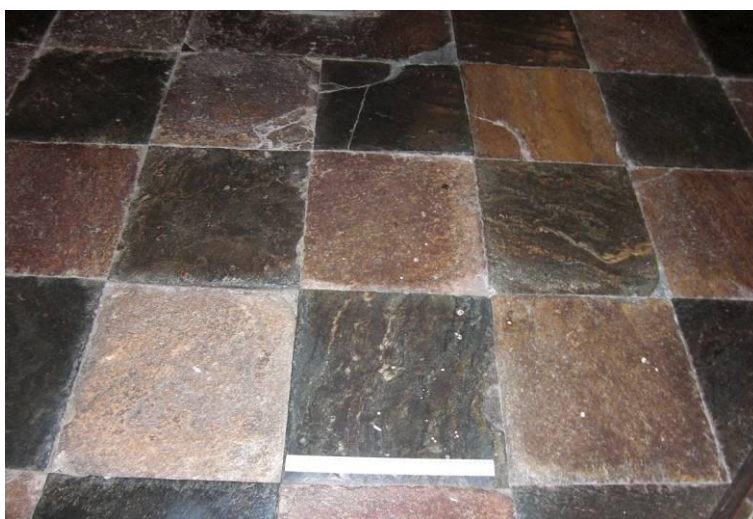
O xisto verde está presente no piso da entrada da igreja, na nave principal e na sacristia. De modo geral, na rocha empregada nos pisos há um padrão de desgaste diferenciado, onde bandas claras apresentam relevo mais alto que o restante da rocha, que é constituído por material fino, de coloração verde (Figura 2.19.b). O xisto utilizado no piso da entrada da igreja, embora deteriorado por processo de desgaste por abrasão, não apresenta manchamento (Figura 2.19.a). Na sacristia, há um piso, constituído por placas intercaladas de xisto e quartzito com dimensões aproximadas de 35 x 35 cm, onde se observam processos de alteração com afundamento de alguns locais e esfoliação com registros de destacamento de material pétreo (Figura 2.19.c).



(a)



(b)



(c)

Figura 2.19 – Igreja Matriz Nossa Senhora de Bonsucesso, Caeté-MG: (a) piso de entrada com lajões de quartzito e xisto verde, (b) piso da nave, com tábuas e xisto verde; (c) piso da sacristia, lajeado de pedras com placas de xisto intercaladas a de quartzito. Fotografias capturadas em junho de 2010.

De modo geral, as ombreiras externas, feitas com o mesmo material das pilastras internas, apresentam processo de alteração mais intenso, em função de sua exposição a

agentes intempéricos. Nos locais onde o xisto verde foi utilizado como piso, foram observadas formas de relevo irregulares, pelo desgaste seletivo de minerais mais macios. Os pisos da entrada da igreja e da nave principal encontram-se com menor desgaste que o piso da sacristia, embora na área externa haja maior circulação de pessoas. Tanto nos elementos estruturais como nos decorativos, predominam as alterações de cunho estético, que, em uma primeira análise, não comprometem a resistência mecânica das rochas.

2.1.4 A Chácara do Barão do Serro, Serro-MG

A cidade de Serro foi importante centro cultural no passado e tem papel especial por ser exemplo e testemunho da política de preservação nacional, visto ter sido a primeira cidade do Brasil a ser tombada pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional, em 1938. A Chácara do Barão de Serro (Figura 2.20) foi originalmente residência de José Joaquim Ferreira Rabello – o Barão de Serro, comerciante de diamantes e coronel da Guarda Nacional. Construída na segunda metade do século XIX, nos tempos áureos do baronato, a chácara seguiu os moldes das chamadas “casas de arrabalde”, encontradas nos registros da arquitetura nas zonas litorâneas brasileiras (Werneck, 2008). É uma chácara localizada nos limites urbanos de Serro, defronte à cidade, que hoje está integrada, mas ainda guarda suas características semirrurais. De propriedade do governo do estado e gerenciada pelo IEPHA, ela fica no perímetro urbano, na margem esquerda do Córrego dos Quatro Vinténs.

A Chácara do Barão do Serro foi selecionada pela presença de um talco-carbonato xisto em diversos espaços e formas de utilização, que conferem a essa residência do século XIX uma marcante singularidade. Segundo critérios propostos no âmbito do programa Monumenta (MEC-Monumenta, 2005), acumula características de rara ocorrência, constituindo-se exemplar único ou excepcionalmente representativo em termos históricos, morfológicos e estilísticos, se comparado com outras edificações do mesmo período em Minas Gerais.

Foi empregada na Chácara rocha metamórfica de composição ultramáfica, denominada carbonato-talco xisto. É uma rocha que apresenta coloração cinza clara quando seca e cinza quando úmida e, como aspecto macroscópico característico, uma foliação marcada por bandas carbonáticas mais claras e por filmes de óxidos (ver Item 3.1- Caracterização petrográfica). A composição mineralógica, composta predominantemente por minerais macios (talco, carbonato e clorita), confere à rocha utilizada baixa resistência ao desgaste por abrasão, fato confirmado no mapeamento nas alterações.

O xisto está em elementos estruturais e, em requintado trabalho de cantaria, em objetos decorativos e funcionais. Ele está presente na escada de acesso principal à residência, nos balaústres e muros da varanda, em conjunto de poltronas localizado nesse mesmo local. No espaço interno da casa, o carbonato-talco xisto está no fogão à lenha e na pia da cozinha. Costa (2009) descreve a utilização desta rocha no sistema de abastecimento de água da casa.

O levantamento de campo foi realizado em maio de 2008, quando a edificação se encontrava em processo de restauração pelo Programa Monumenta, uma parceria entre o Ministério da Cultura e o Banco Interamericano de Desenvolvimento - BID.

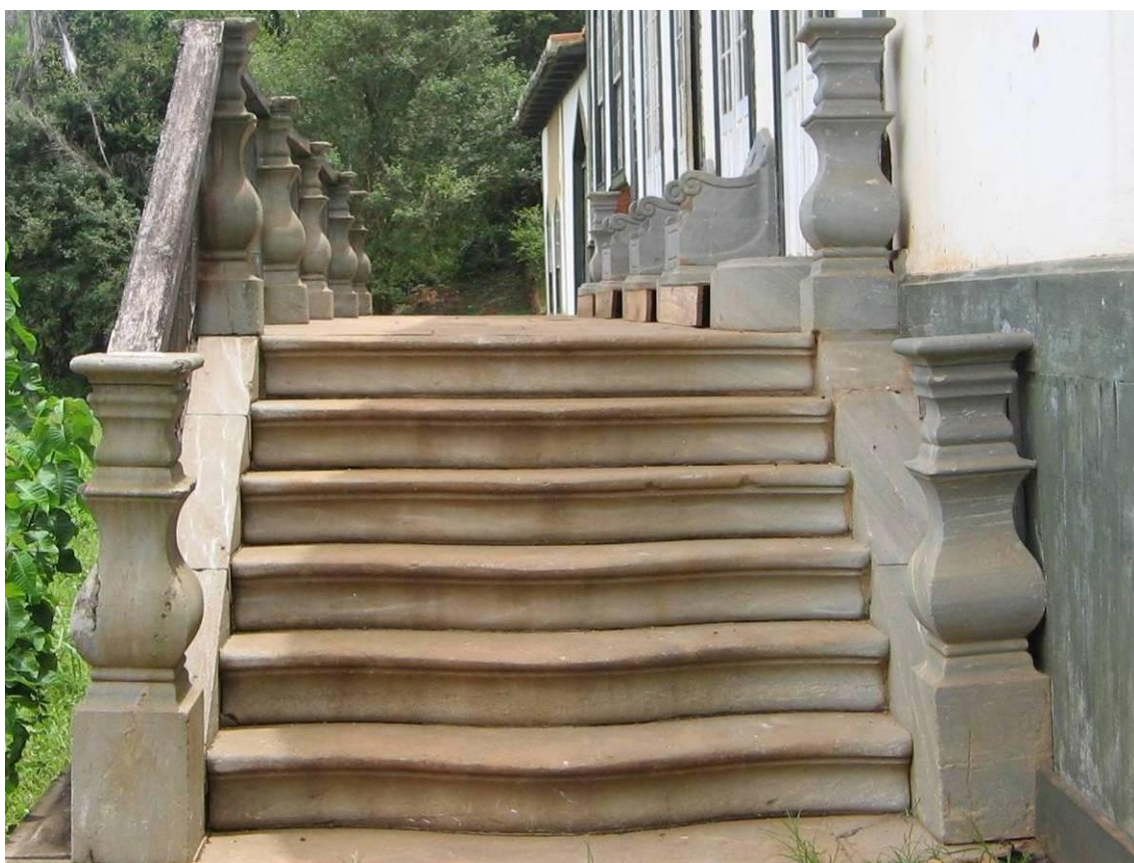


Figura 2.20 - Chácara do Barão do Serro, em Serro-MG - vista panorâmica. Fotografia capturada em maio de 2008, durante processo de restauro, realizado pelo projeto Monumenta.

As escadas de acesso à residência e o guarda-corpo da varanda são adornados por balaústres confeccionados em carbonato-talco-xisto, sujeitos a deteriorações por ações do tempo e por intervenções antrópicas (Figura 2.21.a-b). O estado de deterioração dos balaústres junto às paredes é bem menos intenso que aqueles dispostos no guarda-corpo da varanda, que apresentam decaimento severo. Todos os balaústres apresentam perda de material por fraturamento das quinas e formação de cavidades por dissolução de minerais carbonáticos (Figura 2.22.a). Os balaústres localizados junto às paredes da residência estão mais bem preservados, mas também apresentam essas alterações, com menor intensidade. Em alguns balaústres os fragmentos perdidos foram recompostos com argamassa.



(a)



(b)

Figura 2.21 - Chácara do Barão do Serro, Serro-MG: (a) vista lateral da fachada, com escada de acesso oeste à varanda e guarda-corpo adornado por balaústres em carbonato-talco xisto; (b) escada de acesso leste. Fotografias capturadas em maio-2008.



(a)



(b)

Figura 2.22 - Chácara do Barão do Serro, Serro-MG: balaústres esculpidos em carbonato-talco xisto, localizados no acesso à varanda: (a) balaústre externo com grau de decaimento severo e (b) balaústre interno com decaimento ligeiro. Fotografias capturadas em maio de 2008.

De modo geral, os balaústres externos apresentam colonização biológica, na forma de pátinas alaranjadas, típicas de colonização por algas, e filmes negros. Segundo Aires-Barros (2001), superfícies relativamente abrigadas da escorrência de águas pluviais, mas

ocasionalmente lavadas, tendem a formar pátinas laranja predominantemente logo abaixo dos elementos protetores. Em alguns balaústres observam-se crostas brancas, com aspecto de líquen, que segundo ICOMOS-ISCS (2008), desenvolvem-se preferencialmente nas áreas externas das edificações

No conjunto de poltronas que compõem a varanda o talco-carbonato xisto ora é bandado, com foliação bem marcada, ora tem o aspecto maciço, mas a foliação pode ser detectada com a observação de orientação de parte dos minerais presentes. Em algumas partes também pode ser observado discreto bandamento em tons de cinza (Figura 2.23). Nesses objetos predominam alterações mecânicas, com perdas de fragmentos. As soleiras e as placas que revestem o piso da varanda também foram elaboradas em carbonato-talco xisto. Em algumas partes do piso, as lajes mostram um afundamento por desgaste por abrasão dos pés e esfoliação discreta, por processo de delaminação segundo a xistosidade da rocha (Figura 2.23.a).



Figura 2.23 - Chácara do Barão do Serro -Serro-MG: (a) conjunto de poltronas esculpidas em carbonato-talco-xisto, localizado na varanda principal da antiga residência; (b) poltrona onde se observa a presença de bandas claras e braço quebrado colado com argamassa. Fotografias capturadas em maio-2008.

Na cozinha principal da residência, o fogão à lenha e a pia foram construídos em talco-carbonato xisto e, em ambas as peças, observam-se os aspectos característicos dessa rocha, com coloração cinza clara e foliação marcada pelas bandas esbranquiçadas. Em peças que compõem a frente do fogão à lenha há fraturas com deslocamento (Figura 2.24).



Figura 2.24 - Chácara do Barão do Serro, Serro-MG: fogão à lenha construído em carbonato-talco xisto. Fotografia capturada em maio de 2008, durante processo de restauro conduzido pelo projeto Monumenta.

Os pisos, feitos com carbonato-talco xisto, apresentam-se invariavelmente deteriorados. O mesmo material foi utilizado nos passeios públicos da cidade do Serro, MG. O efeito da abrasão pelos pés, repetido por séculos, levou à formação da depressão observada neste pavimento, localizado na Praça João Pinheiro, logradouro central da cidade de Serro e uma das áreas de circulação na antiga Vila do Príncipe desde o século XVIII (Figura 2.25).



Figura 2.25 - Abaulamento do piso devido a desgaste por abrasão dos pés, em passeio público feito em carbonato-talco xisto. Praça João Pinheiro, Serro-MG. Fotografia capturada em maio de 2008.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Preliminarmente, o desenvolvimento da pesquisa envolveu uma fase de campo, quando foram avaliadas aplicações de rochas xistosas em edificações do patrimônio histórico. A esta, seguiu-se uma fase de laboratório, com a realização de análises e ensaios tecnológicos.

Uma vez concluída a fase de diagnóstico nas edificações históricas, foram realizados ensaios de laboratório em materiais similares àqueles observados nos estudos de caso. Com o objetivo de adquirir informações sobre as propriedades intrínsecas das rochas xistosas e compreender como essas interagem, foram efetuadas caracterizações petrográficas, geoquímicas e tecnológicas.

3.1 MATERIAIS

As rochas que compõem o conjunto de materiais analisados apresentam como característica principal, por definição, uma anisotropia planar, com uma estruturação em folhas em boa parte conferida pela presença de altos conteúdos em filossilicatos. Em função disto, foram avaliados, com especial atenção, os aspectos texturais e a composição mineralógica dos tipos estudados.

3.1.1 Seleção dos tipos de rochas xistosas pesquisadas

Para a seleção dos tipos de rochas foliadas pesquisadas, foram adotados critérios petrológicos, em termos da variação do grau metamórfico, e ambientes geológicos distintos. Com este objetivo, foram coletadas amostras em diferentes regiões do estado de Minas Gerais. Foram avaliadas rochas xistosas geradas sob diferentes condições de metamorfismo, distribuídas nas Províncias São Francisco e Mantiqueira, conforme limites adotados na Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo (Bizzi *et al.*, 2003). Essas províncias ocupam a área central e oriental do estado de Minas Gerais (Figura 3.1) e correspondem, respectivamente, aos limites do Cráton do São Francisco e aos cinturões brasileiros que o bordejam a leste.

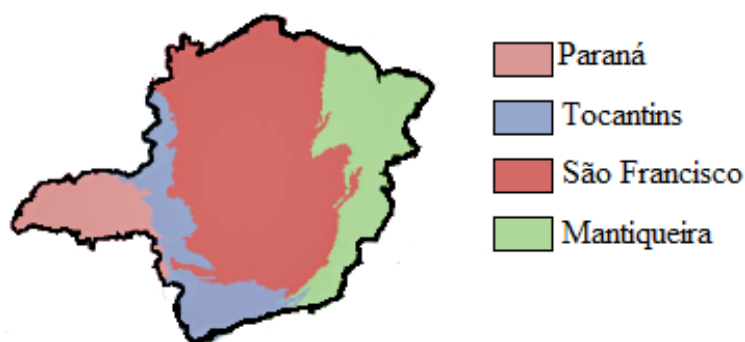


Figura 3.1 - Províncias Estruturais Brasileiras no estado de Minas Gerais (modificado de Bizzi *et. al*, 2003).

O Cráton do São Francisco é a mais bem exposta unidade geotectônica do embasamento da plataforma sul-americana, consolidada ao final da orogênese Transamazônica. O embasamento é constituído por granitóides, gnaisses e granulitos e sequências vulcanossedimentares de idade arqueana e paleoproterozóica. Seus limites são delineados por cinturões dobrados durante a orogênese brasileira (Almeida, 1977). Segundo Alkmim & Marshak (1998) o Cráton consiste de dois domínios sul e nordeste e todos os cinturões que o bordejam (Brasília, Alto Rio Grande, Araçuaí, Sergipano e Riacho do Pontal) tem vergência para seu interior.

As rochas foliadas estudadas estão expostas (a) na região intracratônica na Província de Ardósia do Grupo Bambuí; (b) no Quadrilátero Ferrífero, província metalogenética no extremo sul do Cráton; (c) na porção sul da Serra do Espinhaço Meridional, domínio tectônico interno da Faixa Araçuaí, na borda leste do Cráton do São Francisco e (d) no Médio Vale Jequitinhonha, na porção norte da Faixa Araçuaí. Essas regiões estão delimitadas por retângulos vermelhos no mapa geológico simplificado do Cráton do São Francisco (Bizzi *et al.*, 2003), apresentado na Figura 3.2.

Além de selecionar representantes de graus metamórficos diversos, aspectos relacionados à composição química das rochas foram considerados. Foram selecionados sete litotipos, entre os quais, cinco peraluminosos, um xisto verde e um xisto ultramáfico. Foi formado um conjunto maior com rochas peraluminosas, com base em dois aspectos: (a) correlações de condições de pressão e temperatura em rochas de tipos distintos são mais difíceis; (b) rochas com composição peraluminosa, cujos componentes principais são da fração argilosa e do silte (filiação pelítica), apresentam mudanças mineralógicas e texturais bem caracterizadas, de acordo com o aumento da temperatura e pressão, e servem para o estabelecimento dos sucessivos graus metamórficos (Yardley, 1989).

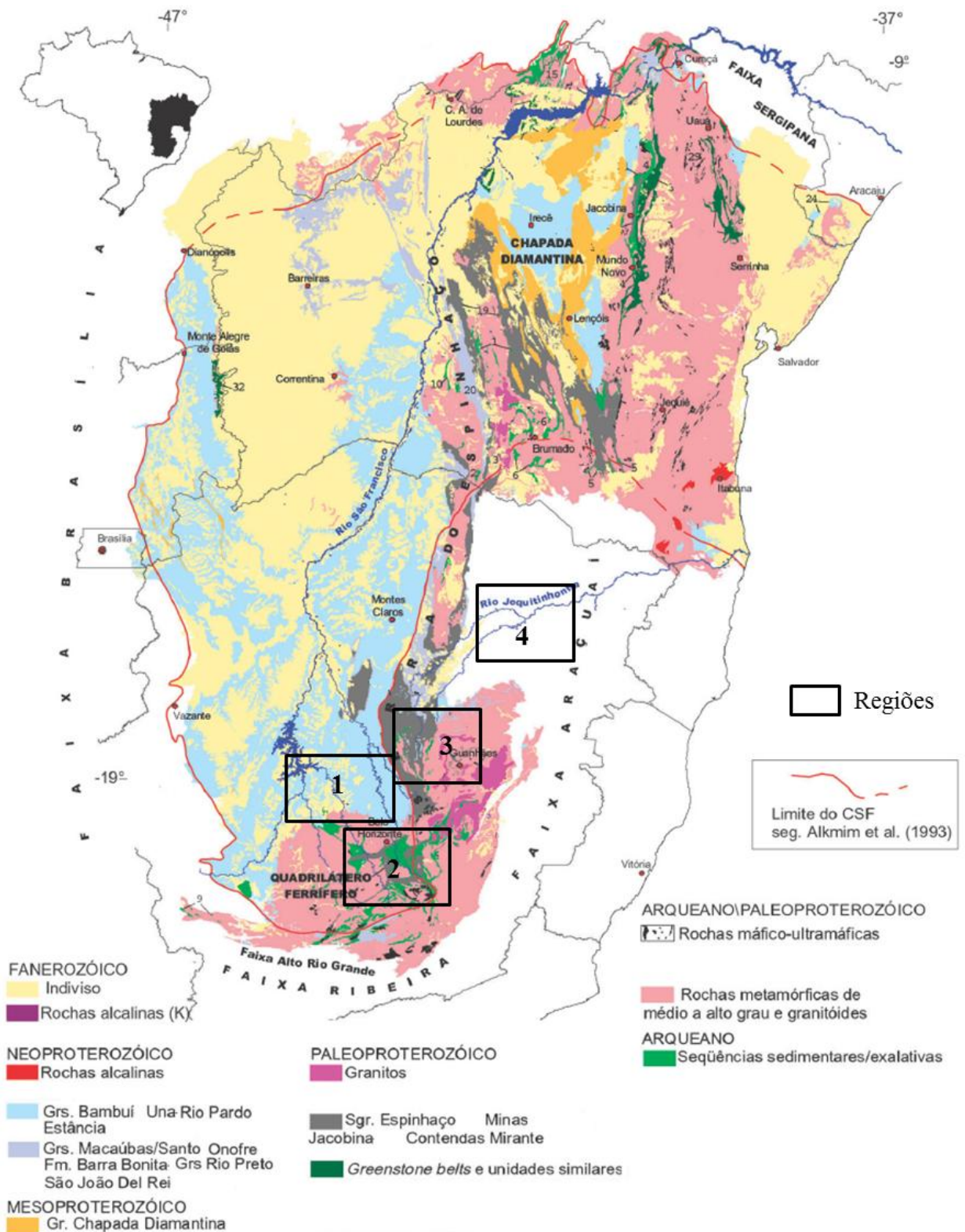


Figura 3.2 - Mapa geológico simplificado do Cráton do São Francisco: retângulos pretos delimitam as regiões onde foram coletadas amostras de rochas xistosas com potencial para rochas ornamentais (modificado de Bizzi *et al.*, 2003).

Somado aos critérios geológicos, procurou-se selecionar rochas que foram ou são utilizadas como rocha ornamental. Assim, amostras de folhelho, que representa o início de uma escala, em termos de granulação e grau metamórfico, foram coletadas na região de Paraopeba. Esse corresponde à rocha denominada comercialmente como ardósia brasileira. Das regiões de Sabará e Mariana foram coletados xistos peraluminosos com cianita ou estauroлита, representando condições metamórficas de médio grau. Na região do Médio Jequitinhonha foram coletados xistos peraluminosos com estauroлита+granada ou porfiroblastos de andaluzita+cordierita, com associações mineralógicas típicas de médio grau metamórfico. No conjunto de rochas peraluminosas (Figuras 3.3.a-f) foi incluída a ardósia negra, da região da Ligúria, na Itália. Este material foi utilizado na basílica de *San Salvatore dei Fieschi*, construído na metade do século XIII. O xisto peraluminoso com cianita corresponde ao litotipo empregado nas edificações históricas do século XVIII, do centro histórico de Mariana.

Além das rochas de peraluminosas citadas, integraram o conjunto pesquisado um xisto verde, com amostras coletadas na região entre as cidades de Caeté e Sabará, e um xisto ultramáfico de composição ultrabásica, coletado na região de Serro (Figuras 3.4.a-b).

O xisto verde corresponde a material similar àquele utilizado na Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso, em Caeté-MG. Trata-se de um metabasalto do Grupo Nova Lima, unidade inferior do Supergrupo Rio das Velhas, de coloração verde, com bandas mais claras constituídas por carbonato, quartzo e albita. Este material empregado na Igreja é semelhante a metabasaltos que ocorrem nos depósitos auríferos de Cuiabá e Lamego, localizados na região entre Caeté e Sabará-MG.

O xisto ultramáfico corresponde ao litotipo empregado em escadarias, soleiras e bancos na cidade do Serro - MG e em trabalhos de cantaria na Chácara do Barão do Serro, edificação do século XIX, apresentada no Item 2.3.

Atualmente, entre as rochas brasileiras estudadas, apenas o folhelho e o xisto com porfiroblastos de andaluzita+cordierita são explotados para aplicação como rocha ornamental, sendo que este último destina-se principalmente ao mercado internacional.

Rochas foliadas peraluminosas

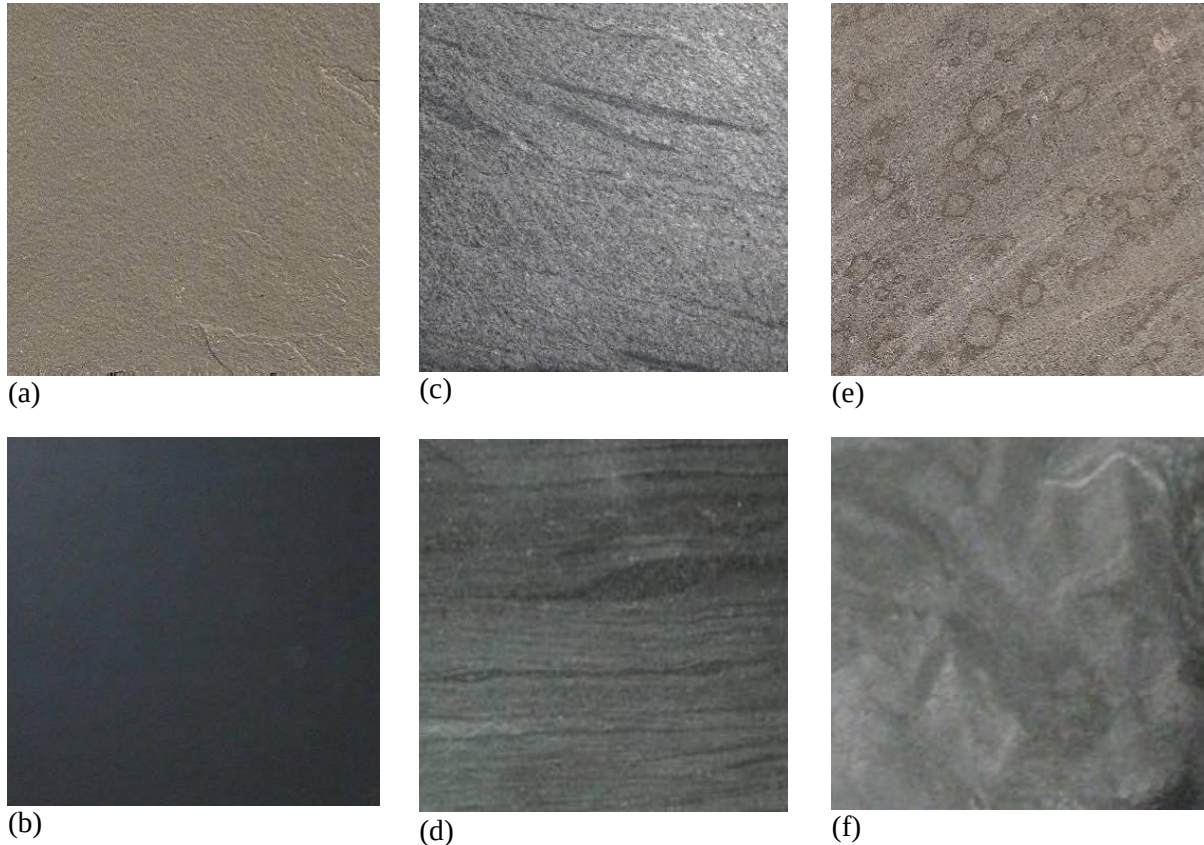


Figura 3.3 - Aspecto macroscópico das rochas selecionadas: (a) folhelho (“ardósia cinza”) do Grupo Bambuí, segmento centro-sul do Cráton do São Francisco, coletado próximo à cidade de Paraopeba; (b) ardósia negra da região da Ligúria (Itália), coletada próxima à cidade de Orero; (c-d) xistos peraluminosos do Grupo Sabará, no Quadrilátero Ferrífero, porção sul do Cráton do São Francisco, coletados próximo às cidades de Sabará e Mariana; (e-f) xistos peraluminosos do Grupo Macaúbas, setor norte da Faixa Araçuaí, coletados próximo às cidades de Araçuaí e Itinga. Recortes de fotografias de chapas com 5 cm², serradas e não polidas.

Xisto verde e xisto ultramáfico

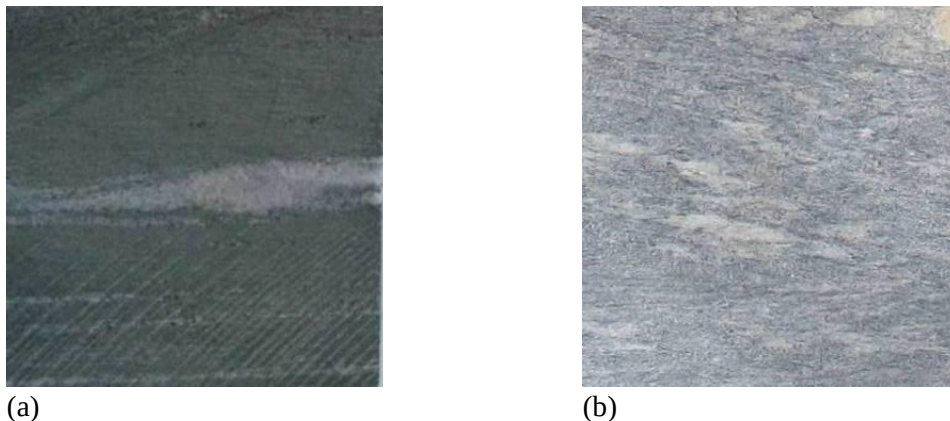


Figura 3.4 - Aspecto macroscópico das rochas selecionadas: (a) xisto verde do Grupo Nova Lima, no Quadrilátero Ferrífero, porção sul do Cráton do São Francisco, coletado entre a cidade de Caeté e Sabará e (b) xisto ultramáfico da Sequencia Serro, Serra do Espinhaço Meridional, coletado próximo à cidade de Serro. Recortes de fotografias de chapas com 5 cm², serradas e não polidas.

3.1.2 Contexto geológico das rochas xistosas pesquisadas

3.1.2.1 *Bacia de Antepaís Bambuí, segmento centro-sul do Cráton do São Francisco*

Em região intracratônica no segmento centro-sul do Cráton do São Francisco afloram rochas do Supergrupo São Francisco, formado pelo Grupo Macaúbas, unidade basal com diamictitos, arenitos e pelitos, e Grupo Bambuí, com rochas sedimentares pelíticas e carbonáticas neoproterozóicas, que se estendem em grandes áreas do Cráton do São Francisco, nos estados de Minas Gerais, Bahia e Goiás (Dardenne, 2000).

A divisão estratigráfica e os ambientes de deposição do Grupo Bambuí, conforme proposta de Dardenne (1978), consiste em unidade basal com sedimentos de origem glacial (Formação Jequitai) sobreposta por três megaciclos de deposição de sedimentos argilo-carbonatos. A Formação Sete Lagoas corresponde ao primeiro ciclo, formado por calcários e dolomitos. A Formação Serra de Santa Helena, do segundo ciclo deposicional, é essencialmente pelítica e segundo Dardenne (2000) indica uma subsidência geral da bacia. Nesta formação estão localizadas as principais jazidas de ardósias de Minas Gerais (Grossi-Sad *et al.*, 1998). Para o topo ocorrem calcários da Formação Lagoa do Jacaré, de ambiente plataformal agitado por marés. Finalizando os ciclos estão as Formações Serra da Saudade e Três Marias, compostas respectivamente por rochas sedimentares pelítico-arenosas e arcósios, depositados em ambientes marinhos litorâneos a sublitorâneos e ambiente flúvio-continental (Figura 3.5).

As rochas do Grupo Bambuí apresentam-se deformadas nas bordas da bacia em função da influência tectônica brasileira das Faixas Araçuai, a leste, e Brasília, a oeste (Alkmim *et al.*, 1993). Na porção sul do Cráton, o Grupo Bambuí foi subdividido em compartimentos metamórficos e estruturais, a saber: (i) ocidental com um cinturão adjacente à Faixa Brasília, vergente para leste; (ii) central, porção da bacia onde as rochas não sofreram deformação significativa, e (iii) um compartimento oriental, adjacente à Faixa Araçuai, vergente para oeste (Martins-Neto & Alkmim, 2001). Em estudos mais recentes, o Grupo Bambuí tem sido associado ao desenvolvimento de uma bacia de antepaís, em resposta flexural ao soerguimento orogenético da Faixa Brasília (Dardenne, 2000; Martins-Neto & Alkmim, 2001).

As litofácies de ritmitos siltico-argilosos, interpretados como turbiditos pelíticos, constituem as Formações Serra de Santa Helena e Serra da Saudade e correspondem às rochas denominadas comercialmente como ardósias (Uhlein *et al.*, 2004), extraídas em pedreiras nas cidades de Paraopeba, Pompéu, Felixlândia e Curvelo (Grossi Sad *et al.*, 2001). Sobre a controvérsia referente a esses litotipos do Grupo Bambuí, se são ou não “ardósias

verdadeiras”, alguns autores, como Grossi-Sad *et al.* (1998) e Chiodi Filho *et al.* (2003) consideram que essas são ardósias verdadeiras, baseados em critérios da fissilidade em lâminas paralelas finas e a existência de uma clivagem penetrativa, conferida pela iso-orientação dos minerais filossilicáticos. Esta clivagem define os planos de partição. A definição comercial de ardósia, constante no Apêndice 3.1 da norma UNE-EN12326-1:2004 (in: Chiodi Filho, 2007), estabelece que “Ardósia é uma pedra facilmente esfoliável em lâminas delgadas ao longo de um plano de esfoliação, resultante de um fluxo de xistosidade originado por um metamorfismo de grau muito baixo a baixo devido a uma compressão tectônica”. Segundo Chiodi Filho (2007), os materiais explotados e comercializados como ardósias em Minas Gerais encaixam-se nesta definição, exceto pelo fato de serem geradas por compressão litostática e não por compressão tectônica, o que constitui a base para a citada controvérsia (A. G. Costa, comunicação verbal).

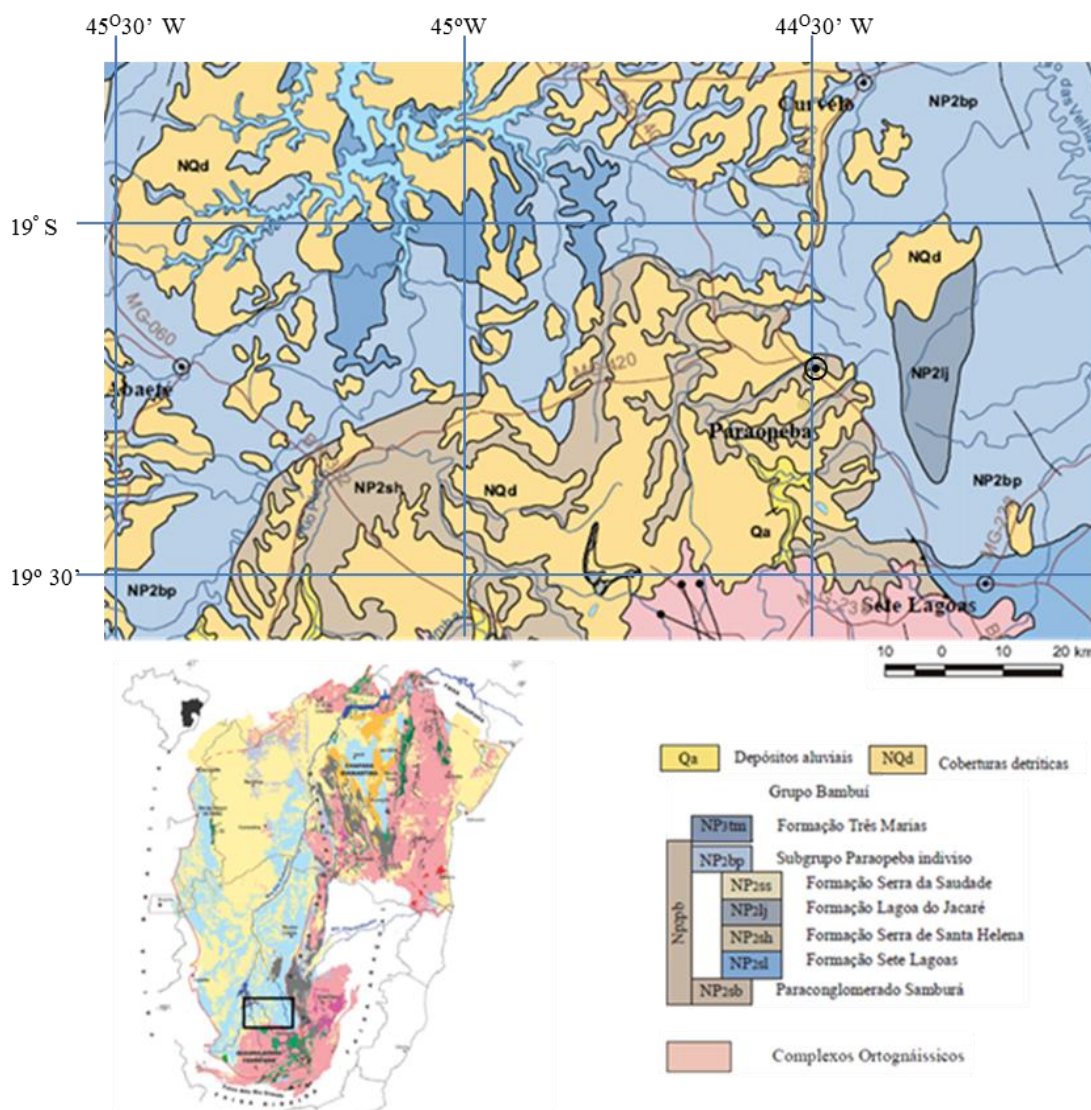


Figura 3.5 - Recorte do mapa geológico do estado de Minas Gerais (1:1.000.000) na porção sul do Grupo Bambuí (COMIG, 2003), com posição projetada no mapa esquemático do Cráton do São Francisco (Bizzi *et al.*, 2003).

3.1.2.2 **Quadrilátero Ferrífero, borda sul do Cráton do São Francisco.**

O Quadrilátero Ferrífero corresponde a uma província metalogenética situada na porção sul do Cráton do São Francisco e que tem sua geometria definida por um arranjo de domos e sinclinais de escala quilométrica. Suas principais unidades litoestratigráficas são os terrenos gnaissicos-migmatíticos arqueanos, o Supergrupo Rio das Velhas, que constitui uma sequência vulcanossedimentar arqueana do tipo *greenstone belt*, o Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi, constituídos por rochas metassedimentares supracrustais paleoproterozóicas, e corpos intrusivos pós-Minas (Dorr II, 1969; Alkmim & Marshak, 1998).

O **Supergrupo Rio das Velhas** é um cinturão de rochas verdes arqueano, constituído principalmente por rochas metamáficas e metaultramáficas e secundariamente por lavas riolíticas e intercalações de metassedimentos. As rochas metassedimentares são essencialmente siliciclásticas, carbonáticas e formações ferríferas bandadas (Alkmim & Marshak, 1998). Sua estratigrafia está dividida no Grupo Nova Lima, unidade basal com rochas vulcânicas, formações ferríferas e rochas metassedimentares clásticas arenosas e pelíticas; e o Grupo Maquiné, unidade superior constituída essencialmente por sedimentos clásticos, conglomeráticos a pelíticos. Os principais litotipos são os clorita xistos formados por metamorfismo de baixo grau em rochas vulcânicas básicas e ultrabásicas (Dorr II, 1969).

O **Supergrupo Minas** constitui uma sequência sedimentar proterozóica, formado predominantemente por metassedimentos plataformais que totalizam mais de 4.000 metros de espessura, que se assenta em discordância erosiva sobre o Supergrupo Rio das Velhas. Compõem o Supergrupo Minas, da base para o topo os grupos Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará (Gair, 1958; Dorr II, 1969; Renger *et al.*, 1994). As rochas metassedimentares clásticas dos Grupos Caraça, Itabira e Piracicaba formam uma sequência de ambiente de sedimentação entre o fluvial deltaico e o marinho plataformais. Os metassedimentos clásticos do Grupo Caraça são sobrepostos por rochas do Grupo Itabira, com formações ferríferas bandadas da Formação Cauê, que gradam para uma sequência carbonatada da Formação Gandarela. Sobreposição à Formação Gandarela o Grupo Piracicaba, formado por unidades clásticas e químicas, corresponde a uma espessa camada de sedimentos de ambiente de águas rasas e deltaico. As rochas do Grupo Sabará, unidade no topo do Supergrupo Minas, ocorrem por todo o Quadrilátero Ferrífero, em discordância erosiva sobre o Grupo Piracicaba. Constituem uma espessa sequência de sedimentos imaturos com contribuição vulcânica, derivados de uma fonte a leste-sudeste (Alkmim & Marshak, 1998) e que caracterizam um ambiente de depósitos marinhos imaturos (Dorr II, 1969; Rosière & Chemale, 2000).

O **Grupo Itacolomi** é a unidade estratigráfica do topo da sequência pré-cambriana do

Quadrilátero Ferrífero (Figura 3.6). Está em discordância erosiva e angular sobre as rochas do Grupo Sabará (Supergrupo Minas) e é composto essencialmente por quartzitos imaturos e metaconglomerados grão-suportados.

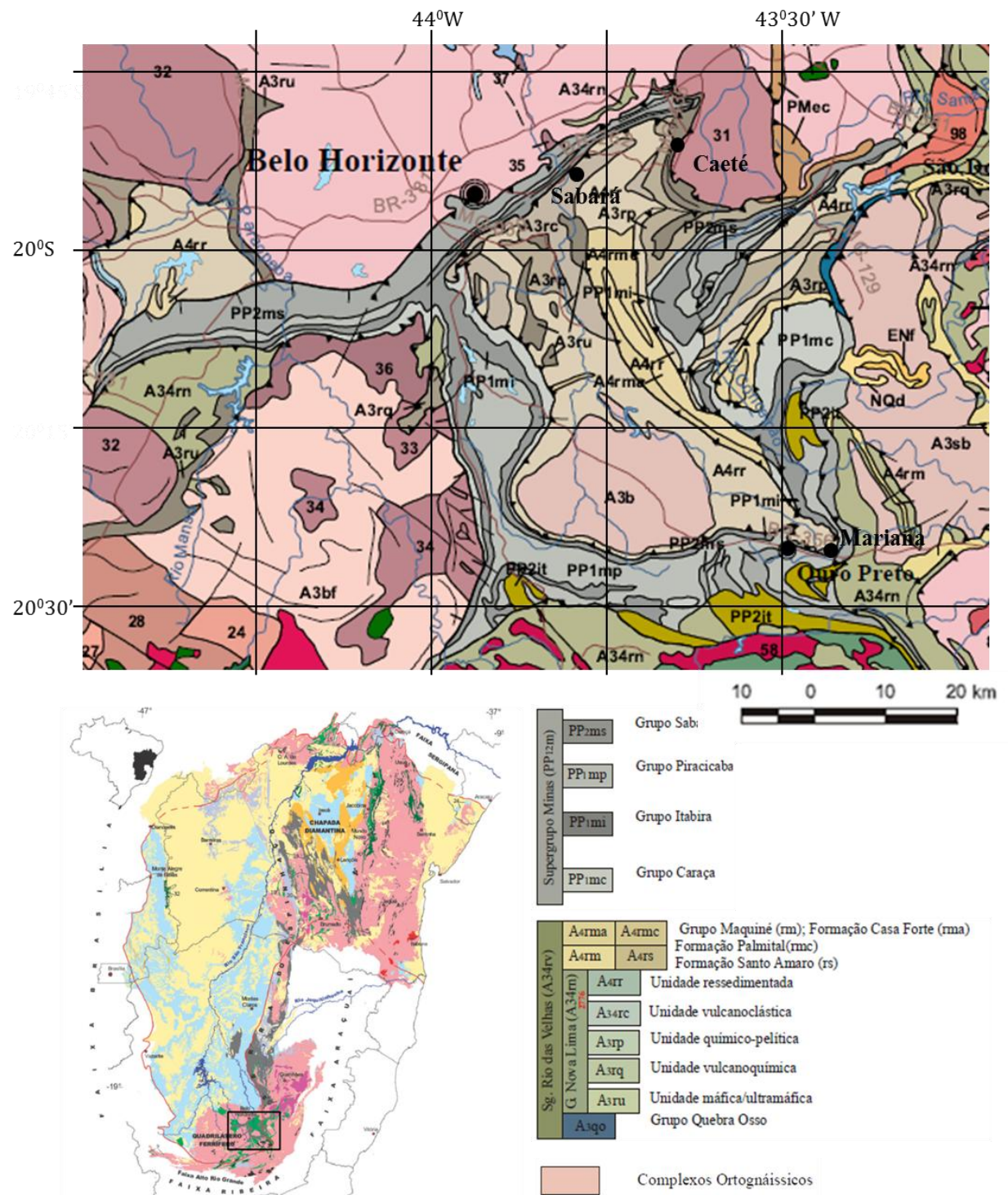


Figura 3.6 - Recorte do mapa geológico do estado de Minas Gerais (1: 1.000.000) na região do Quadrilátero Ferrífero (COMIG, 2003), com sua posição projetada no mapa esquemático do Cráton do São Francisco (Bizzi *et al.*, 2003).

Nas rochas do Quadrilátero Ferrífero observa-se, em termos gerais, um zoneamento

metamórfico crescente de oeste para leste. O metamorfismo grada desde fácies xisto verde inferior a anfibolito inferior, segundo Herz (1978), que definiu zonas da clorita, biotita e estauroлита, com temperaturas de equilíbrio crescentes para leste e valores aproximados entre 300 e 600°C. Em revisão histórica sobre o metamorfismo no Quadrilátero Ferrífero, Pires & Bertolino (1991) apresentam quatro zonas metamórficas, a saber: clorita, biotita, cianita e estauroлита, que seguem aproximadamente as unidades estratigráficas arqueanas do Supergrupo Rio das Velhas e proterozóicas do Supergrupo Minas. Localmente há interferências de metamorfismo de contato, nas auréolas dos entorno dos domos. Jordt-Evangelista *et al.* (1992) descrevem, na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, metassedimentos do Grupo Sabará, adjacentes a granitóides, metamorfizados para fácies anfibolito, em uma auréola com alguns quilômetros de largura e metamorfismo mais alto que o regional. A despeito dessas variações locais, predomina um padrão geral do metamorfismo mais intenso em direção a sudeste.

Regionalmente as rochas do Supergrupo Rio das Velhas estão metamorfizadas na fácies xisto verde, mas processos hidrotermais definem um padrão local e imprimem às rochas novas texturas e associações minerais. Nas rochas do Grupo Nova Lima, unidade basal do Supergrupo Rio das velhas, que hospedam os principais depósitos de ouro do Quadrilátero Ferrífero, esses processos foram descritos de forma detalhada. Para as rochas metavulcânicas máficas do Grupo Nova Lima, são descritas associações minerais resultantes de processos de alteração hidrotermal, distribuídas segundo um padrão de zonas de alteração (i) distal da clorita, (ii) intermediária do carbonato e (iii) proximais de mica branca e do sulfeto; presentes nos depósitos auríferos de Lamego e Cuiabá (Lobato *et al.*, 1998, 2001a, 2001b). O Quadro 3.1 apresenta as zonas de alteração e os minerais observados em cada uma delas.

	Rocha vulcânica máfica menos alterada (metabasalto)	Zonas de alteração hidrotermal			
		A clorita	A carbonato	A sericita	A sulfeto
		15-100 m	1-20 m	1-15 m	0,1-2 m
Plagioclásio (albita)					
Actinolita					
Epidoto/clinozoisita					
Clorita					
Quartzo					
Carbonato (muscovita/paragonita)					
Mica branca					
Sulfetos					

Quadro 3.1 - Sequência de formação dos minerais por zonas de alteração de metabasalto, no depósito Cuiabá (Ribeiro-Rodrigues, 1998).

3.1.2.3 Borda leste da Serra do Espinhaço Meridional, Faixa Araçuaí

A Serra do Espinhaço em seu segmento sul, chamado de Serra do Espinhaço Meridional, corresponde a um cinturão contido na unidade ocidental da Província Mantiqueira, na borda leste do Cráton do São Francisco. Com direção norte-sul e cerca de 300 km de extensão, estende-se desde o Quadrilátero Ferrífero até o norte de Minas Gerais (Zapparoli, 2001). Segundo compartimentação apresentada por Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos (2000), a região insere-se do domínio tectônico interno da Faixa Araçuaí, entre os subdomínios norte e sul, uma vez que aflora a norte e a sul do paralelo 19° S, limite aproximado para os referidos subdomínios. Compõem a geologia da Serra do Espinhaço Meridional as seguintes unidades litoestratigráficas: Complexo Basal, Sequência Serro, Sequência vulcanossedimentar Rio Mata Cavalo, Supergrupo Rio Paraúna, Supergrupo Espinhaço e Supergrupo São Francisco.

Nesta tese foi avaliado xisto ultramáfico da Sequência Serro, que constitui um conjunto de rochas máficas e ultramáficas e, em menor quantidade, rochas sedimentares químicas e detríticas, de idade arqueana, metamorfizadas em fácies xisto verde (Uhlein & Dardenne, 1984; Uhlein *et al.*, 1986). As rochas dessa sequência afloram do domínio oriental da Serra do Espinhaço Meridional e juntamente com as outras unidades que ocorrem associadas a ela, definem uma faixa de direção N-NE/S-SW, dispostas como escamas tectônicas associadas a processo deformacional compressivo neoproterozóico (Zapparoli, 2001). No xisto magnesiano que ocorre na região da cidade do Serro, o metamorfismo atingiu a fácies anfibolito, com retrometamorfismo para fácies xisto verde e processo de alteração hidrotermal pervasivo, sin a pós-deformação e responsável por grande parte da mineralogia presente nas referidas rochas (Zapparoli, 2001). Uhlein (1982) atribui para essas rochas ultramáficas da Sequência Serro uma origem efusiva associada a uma sequência do tipo “greenstone belt”, propondo a denominação Sequência Vulcanossedimentar de Serro. No mapa geológico de Minas Gerais ao milionésimo (COMIG, 2003), essas rochas são denominadas como Greenstone Belt Serro, com idade arqueana, composto por rochas metamáficas e metaultramáficas, metavulcânicas ácidas, formações químico-exalativas ferríferas bandadas e xistos, conforme pode ser observado no recorte da área de interesse (Figura 3.7).

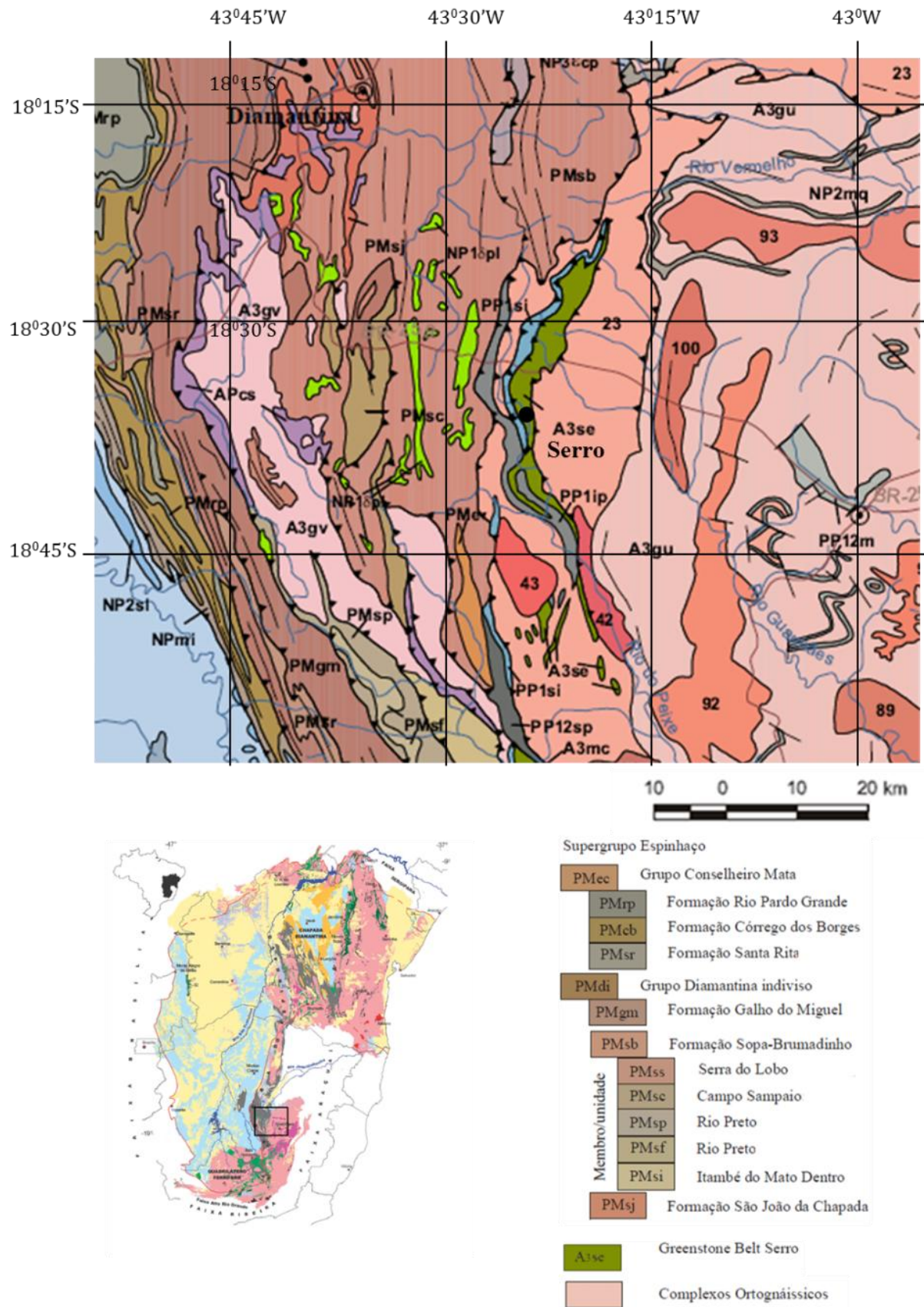


Figura 3.7 - Recorte do mapa geológico do estado de Minas Gerais (1: 1.000.000) na região da Serra do Espinhaço Meridional (COMIG, 2003), com sua posição projetada no mapa esquemático do Cráton do São Francisco (Bizzi *et al.*, 2003).

3.1.2.4 Médio Vale do Jequitinhonha, Setor Norte da Faixa Araçuaí.

A Faixa Araçuaí foi originalmente definida por Almeida (1977) com um cinturão de dobramentos brasileiro adjacente às bordas sul e sudeste do Cráton do São Francisco, nos estados de Minas Gerais e Bahia. A Faixa Araçuaí corresponde ao cinturão metamórfico externo do Orógeno Araçuaí, que engloba o domínio orogênico brasileiro compreendido entre o Cráton do São Francisco e a margem leste brasileira. O Orógeno Araçuaí apresenta três compartimentos tectônicos: domínio externo, constituído por faixa de dobramentos e empurrões; o domínio interno que corresponde ao núcleo metamórfico-anatético do orógeno; e a inflexão setentrional, com segmentos dos dois domínios anteriores (Pedrosa-Soares *et al.*, 2001).

No domínio externo do Orógeno Araçuaí afloram rochas do Grupo Macaúbas, que constitui uma espessa sequência de sedimentos neoproterozóicos glaciogênicos, que mostram estruturas de dobramentos e empurrões vergentes para oeste e metamorfismo da fácies xisto verde a anfibolito (Pedrosa-Soares *et al.*, 2001). Segundo Cukrov *et al.* (2005), o Grupo Macaúbas forma uma sequência de depósitos glaciogênicos e gravitacionais de borda cratônica, com expressiva variação lateral de fácies e que sofreram efeitos da deformação brasileira. O Grupo Macaúbas engloba unidades proximais, que contém rochas sedimentares e vulcânicas, que registram estágios de evolução da bacia desde fase *rift*, com sequências pré-glaciais e glaciais, até fase transicional com sequências glaciais marinhas (Noce *et al.*, 1997; Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos, 2000). A unidade distal do Grupo Macaúbas, conforme definido por Lima *et al.* (2002), é a Formação Ribeirão da Folha, caracterizada por uma associação vulcanossedimentar onde predominam pelitos e semipelitos com intercalações de rocha cálcio-silicática, formações ferríferas e rochas vulcânicas máficas.

Para o estudo de rochas ornamentais, foram avaliados xistos peraluminosos na região do Médio Jequitinhonha, nordeste do estado de Minas Gerais, que se insere no setor norte da Faixa de Dobramentos Araçuaí. Nessa região, além das supracrustais, ocorrem corpos granitóides neoproterozóicos relacionados ao Orógeno Araçuaí, conforme representado na Figura 3.8, que contém recorte do mapa geológico de Minas Gerais, na área de interesse. Na região central do município de Araçuaí e na região centro-sul de Itinga afloram rochas da Formação Ribeirão da Folha, representadas essencialmente por mica xistos, metagrauvacas/metarcóseos, grafita xistos; rochas metamáficas; metaconglomerados e mais raramente formações ferríferas bandadas e orto-anfibolitos (Monteiro *et al.*, 2004). Com base nas paragêneses observadas, Costa (1990) definiu, para a região entre Coronel Murta (oeste) e Itinga (leste), uma sequência de rochas metamórficas regionais do tipo baixa pressão, com

3.1.3 Localizações dos pontos de coleta de amostras

As localizações dos pontos de coleta das rochas selecionadas estão representados no mapa da Figura 3.9. Nos afloramentos, quando foram observadas as presenças de dobras, as amostras foram coletadas nos flancos e evitadas as zonas de charneira.

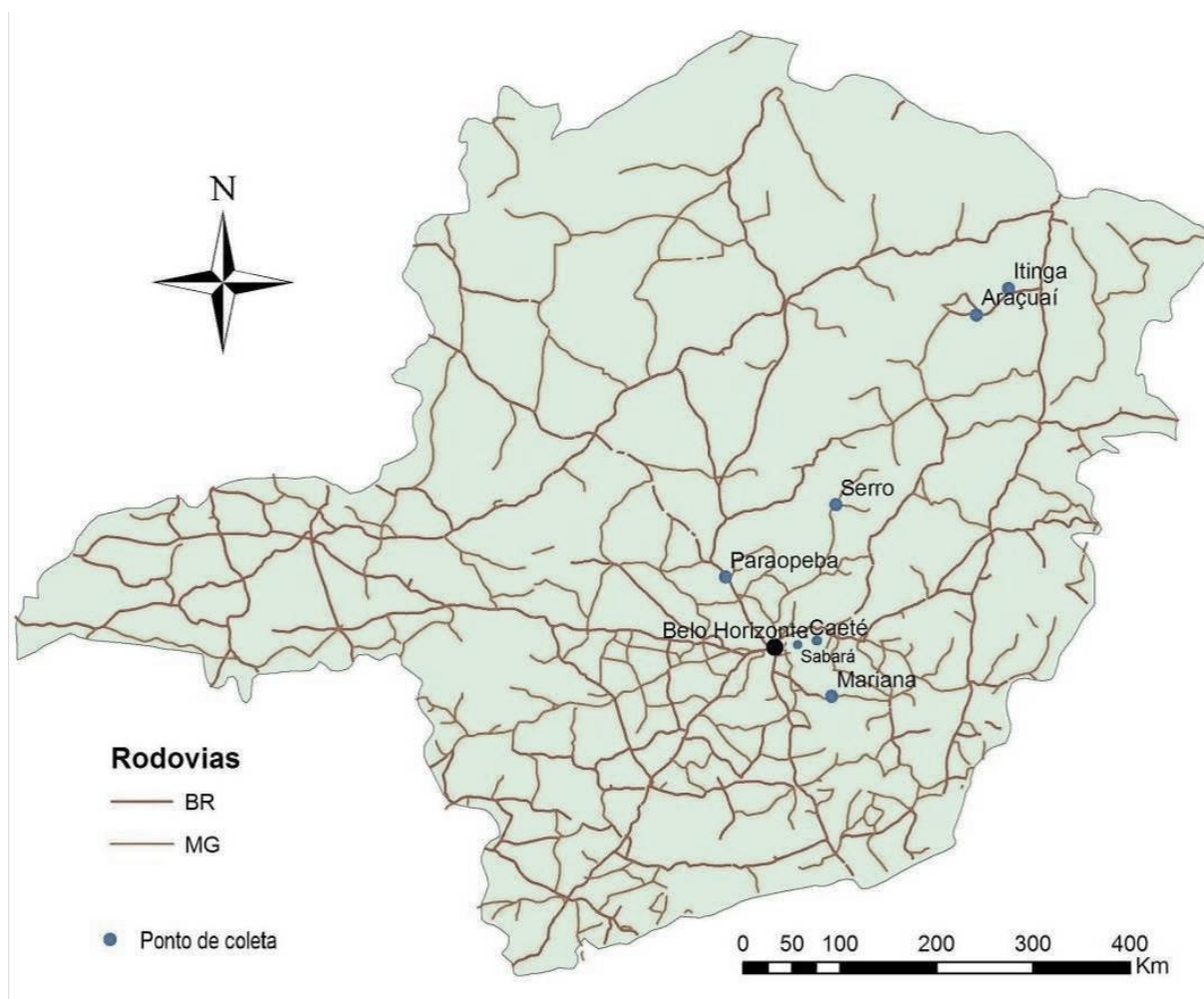


Figura 3.9 - Localização das áreas de coleta de materiais no estado de Minas Gerais.

3.1.3.1 Rochas peraluminosas

3.1.3.1.1 Folhelho da Bacia Bambuí, segmento centro-sul do Cráton do São Francisco

A maior região produtora de folhelho ornamental no Brasil, comercialmente designada como “Província de Ardósia de Minas Gerais”, abrange uma área de aproximadamente 7.000 km² em uma região intracratônica no segmento centro-sul do Cráton do São Francisco. Segundo Chiodi Filho *et al.* (2003), a Província de Ardósia de Minas Gerais originou-se dos modelos tectônicos e de sedimentação brasileiros, confinada à porção estável da bacia

BambuÍ, onde seus limites a leste e a oeste coincidem com faixas deformadas - o limite norte é a Formação Três Marias e o limite sul o contato do Complexo Basal.

Para o presente estudo, foram coletadas amostras do folhelho (“ardósia cinza”), em pedreira na região de Paraopeba-MG.

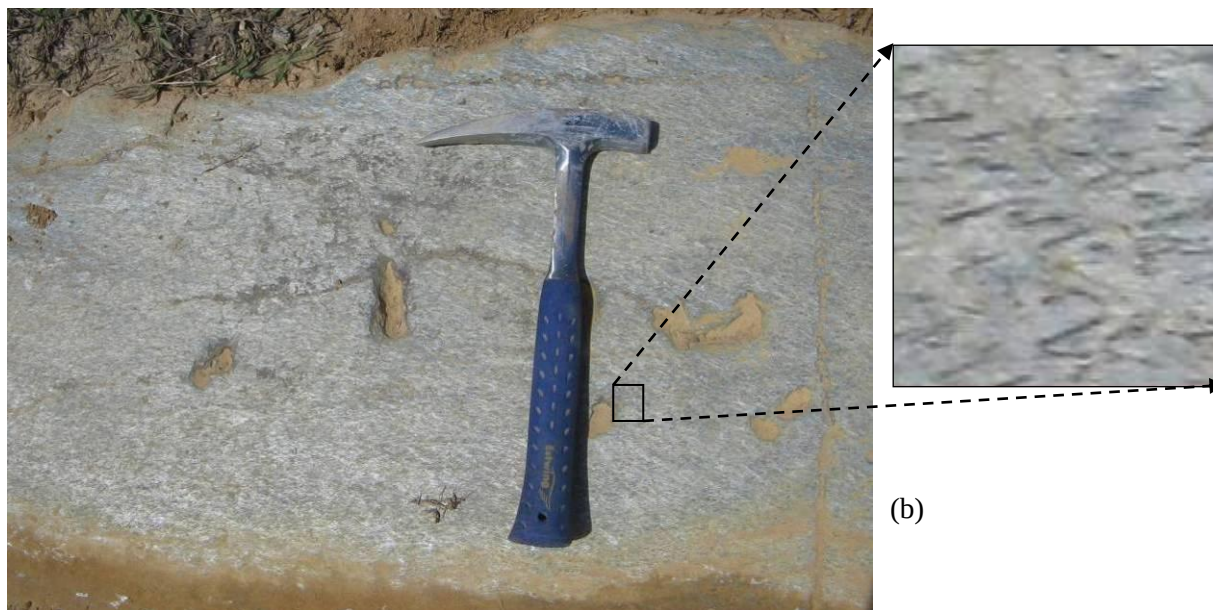
3.1.3.1.2 Xistos peraluminosos do Quadrilátero Ferrífero, borda sul do Cráton do São Francisco

Na província metalogenética do Quadrilátero Ferrífero, foram amostrados, em locais distintos, dois xistos peraluminosos do Grupo Sabará, unidade no topo do Supergrupo Minas. O primeiro litotipo foi coletado na localidade tipo, ao longo de um trecho de rodovia Belo Horizonte - Sabará, na Serra do Curral e é um xisto peraluminoso com granada e estaurolita (Figura 3.10). A presença de estaurolita, além de mineral índice no esquema zonal barroviano, indica que a rocha é um pelito verdadeiro, rico em Al e pobre em Ca (Yardley, 1989). Em termos de grau metamórfico, este litotipo está no início da fácies anfibolito.



Figura 3.10 - Ponto de coleta de xisto peraluminoso com granada e estaurolita do Grupo Sabará, próximo à cidade de Sabará-MG. Coordenadas Latitude 19°52'47"S, Longitude 43°49'55"O.

O segundo litotipo do Grupo Sabará foi coletado próximo à localidade de Passagem de Mariana e é um xisto peraluminoso com granada e cianita. Este xisto, segundo Costa & Maciel (2001), foi amplamente utilizado em monumentos do século XVIII em Mariana, Minas Gerais. Na região onde foram coletadas as amostras, há vários blocos com registros de trabalho antrópico, com cortes e entalhes de ferramentas (Figura 3.11). O acesso é feito em estrada de terra, intransitável para veículos, a partir de 20 km da confluência com a estrada de contorno de Ouro Preto - Mariana.



(a)

Figura 3.11 - Bloco de cianita xisto em Passagem de Mariana-MG, próximo ao local de coleta das amostras: (a) marcas de entalhe por ferramentas; (b) no detalhe, cristais orientados milimétricos de cianita, ampliados no quadro à direita. Coordenadas Latitude 20° 24'33"S, Longitude 43°26'24"O.

3.1.3.1.3 Xistos peraluminosos do Médio Jequitinhonha, Setor Norte da Faixa Araçuaí

Como representantes dos xistos peraluminosos do Médio Jequitinhonha, foram amostradas rochas aflorantes entre as cidades de Araçuaí e Itinga. Em pedreira localizada a norte da cidade Araçuaí (Figura 3.12), foram coletadas amostras de estaurolita-granada-mica xisto. Na época da coleta da amostra (2008), esse material era extraído para ser empregado como brita e pedra de calçamento. Trata-se de um xisto com granulação fina, tonalidade acinzentada, com nódulos milimétricos de quartzo, que conferem à rocha um aspecto mosqueado característico. Em termos metamórficos, está na zona da granada-estaurolita-biotita-moscovita, de acordo com classificação proposta por Costa (1990).



Figura 3.12- Local de amostragem do estaurolita-granada-mica xisto, pedreira nos arredores de Araçuaí-MG. Coordenadas Latitude 16°49'36"S, Longitude 42°03'36"O. Fotografia capturada em fevereiro-2008.

Em Itinga, foi amostrado um cordierita-andaluzita-mica xisto de coloração cinza escura. Apresenta como característica marcante uma textura porfiroblástica, com cristais centimétricos de andaluzita e cordierita. Trata-se de um xisto da zona da andaluzita e cordierita, que corresponde à zona com grau metamórfico mais alto em relação ao xisto de Araçuaí, segundo classificação proposta por Costa (1990).

Este material é um dos poucos exemplos brasileiros de extração comercial de xisto peraluminoso, para utilização como rocha ornamental, com algumas áreas já em cava e outras em processo de pesquisa. A Figura 3.13 mostra a pedreira onde foram coletadas as amostras do cordierita-andaluzita-mica xisto, na região de Itinga.



Figura 3.13 – Local de amostragem do cordierita-andaluzita-mica xisto, em pedreira próxima à cidade de Itinga-MG. Coordenadas Latitude 16°38'40"S, Longitude 41°50'39"O.

3.1.3.2 Xisto verde

Amostras de material semelhante ao utilizado na Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso, Caeté-MG, foram coletadas na região a sul de Caeté, em direção a Morro Vermelho (Figura 3.14), em talude na ferrovia EFVM (Companhia Vale). Também foram coletadas amostras na mina de Lamego, onde foram amostrados metabasaltos localizados em região do depósito onde atuaram processos de alteração hidrotermal com carbonatação.



Figura 3.14 - Local de coleta de amostras do xisto verde, próximo à cidade de Caeté, em talude da Ferrovia EFVM. Coordenadas Latitude 19°55'47"S, Longitude 43°40'43"O.

3.1.3.3 Xisto ultramáfico

Um xisto ultramáfico pertencente à Sequência Serro, da borda leste da Serra do Espinhaço Meridional, também foi selecionado. Trata-se de um de carbonato-talco xisto, cujas amostras foram coletadas no Morro do Cruzeiro, onde há uma cava desativada de cromita, com boas exposições dessa rocha (Figura 3.15). A área situa-se no limite norte do perímetro urbano da cidade do Serro. Segundo Alves (1966), mesmo antes da descoberta do depósito de cromitito na década de 1960, a prefeitura da cidade de Serro já retirava rochas desse local para pavimentação das ruas. São encontrados neste depósito três litologias, com predomínio de lentes e/ou pods de talco-clorita xisto e cromitito, contidos em um pacote de clorita-cromita-carbonato-talco xisto (Zapparoli, 2001). Esse último corresponde ao material empregado na Chácara do Barão do Serro.



Figura 3.15 – Local de coleta de amostras do carbonato-talco xisto, em depósito do Morro do Cruzeiro, pedreira desativada de cromitito, localizada nos arredores da cidade do Serro-MG. Coordenadas Latitude 18°35'49"S, Longitude 43°22'47"O.

3.2 MÉTODOS DE ANÁLISE

3.2.1 Análise petrográfica

A análise petrográfica envolveu a descrição da composição mineral e aspectos texturais das rochas. No levantamento das feições texturais das rochas, foram observados os seguintes aspectos: presença de microestruturas, formas dos grãos, relações de contato entre grãos, tamanhos absolutos e distribuições de tamanhos dos grãos. Na literatura, o termo textura é encontrado com dois significados distintos, de acordo com a área de pesquisa. Ele tanto pode se referir a orientações cristalográficas preferenciais (OCP), como a aspectos de forma, tamanho, distribuição e orientação dos cristais (Miyashiro,1973; Spry,1986, entre outros). Esse último significado, tendo como sinônimos microtrama ou microestrutura, foi o adotado para o trabalho.

Para todos os litotipos, foram preparadas lâminas delgadas, seccionadas segundo o plano XY, paralelo à foliação, e o plano XZ, perpendicular à foliação e paralelo à lineação mineral. Para os xistos peraluminosos do Médio Jequitinhonha (região entre Araçuaí e Itinga), que contêm porfiroblastos e nódulos milimétricos a centimétricos, possíveis de serem medidos macroscopicamente, foram preparadas chapas para a realização de medições das referidas feições. Para o folhelho, cujo tamanho de grão é da ordem de micron, foi necessário o uso de imagens de seções polidas, lidas no microscópio eletrônico de varredura – elétrons retro-espalhados (MEV/BSE).

Nas rochas xistosas estudadas predominam cristais com tamanho muito fino. Na análise realizada diretamente ao microscópio petrográfico, este aspecto aumenta a imprecisão das medições. Além disso, as observações feitas com lentes objetivas com maior aumento englobam áreas menores das lâminas, exigindo um maior dispêndio de tempo. Em etapa subsequente à descrição ao microscópio petrográfico, foram realizadas medidas quantitativas com técnicas de processamento digital de imagens, empregando fotografias de chapas, fotomicrografias de lâminas delgadas e imagens de seções polidas lidas no MEV. Essa técnica foi adotada com dois objetivos: (a) conferir maior precisão aos dados da análise petrográfica; (b) aumentar a representatividade das descrições, ao favorecer que um número maior de áreas nas lâminas fosse analisado.

O conjunto de rochas estudadas apresenta aspectos petrográficos distintos que exigiram que a metodologia adotada fosse flexível e se adaptasse às peculiaridades de suas propriedades, tanto na fonte de aquisição das imagens, como na escolha de procedimentos de processamento digital de imagens propriamente ditas.

3.2.1.1 Processamento digital de imagens

Na fase subsequente à descrição petrográfica qualitativa, foram realizados procedimentos de modelamento textural que, segundo Higgins (2006), envolvem essencialmente três fases: a classificação da rocha em fases minerais, a separação, que corresponde à definição de fronteiras entre grãos, e as extrações dos parâmetros geométricos ou texturais. O processamento digital de imagens foi o método eleito para esta fase, por oferecer técnicas específicas de classificação, que quando realizadas com os devidos critérios e verificações quanto à consistência petrográfica, permitem que os parâmetros geométricos dos objetos resultantes sejam medidos automaticamente por funções matemáticas, o que confere maior precisão aos dados. O sistema selecionado para os procedimentos desta fase foi o programa MATLAB R2010a, que consiste em um aplicativo de computação numérica com ferramentas de desenvolvimento de algoritmos, visualização e análise de dados. Este sistema é consagrado pelo uso acadêmico e entre suas vantagens, oferece a flexibilidade necessária em uma pesquisa, pela possibilidade de desenvolvimento de rotinas, com uma coleção de funções de processamento de imagens, que permitem a definição de fronteiras de grãos e funções matemáticas para o cálculo de parâmetros texturais, tais como tamanho e orientação de cristais.

Para a análise petrográfica, englobando identificação de fases minerais e cálculo dos parâmetros geométricos, o tamanho dos grãos definiu a fonte de captura de imagem empregada. Considerando a disponibilidade tanto do microscópio petrográfico com captura direta de imagens, como do microscópio eletrônico de varredura, as rochas foram separadas em dois grupos. No primeiro grupo, com seis dos sete tipos estudados, os tamanhos dos cristais permitiram o uso de imagens do microscópio petrográfico, cujas magnificações das objetivas disponíveis mostraram-se satisfatórias para o objetivo proposto. Já no caso do folhelho, o tamanho médio dos grãos, com ordem de grandeza de poucos microns, exigiu o uso de imagens com maior magnificação, geradas por leituras de elétrons retro-espalhados (BSE) no microscópio eletrônico de varredura (MEV).

A captura direta de imagens digitais tanto no microscópio petrográfico, como no microscópio eletrônico de varredura, favoreceu que o trabalho de medição dos parâmetros geométricos fosse mais preciso e permitiu a individualização de cristais em escala micrométrica. O valor do pixel não foi calculado por escala gráfica, mas informado nos metadados das imagens, conforme exemplo apresentado no Quadro 3.2.

```

<ImageData>
<Annotation>
<ScaleBarUserDefLength>1000</ScaleBarUserDefLength>
<ImageCalibration OnePixel="1.2800000190734864" unit="Microns" />
<Time>11:32</Time>
<ImageName>Caete_pt2_012</ImageName>
<Date>25/4/2011</Date>
</ImageData>

```

Quadro 3.2 - Dados de imagem de lâmina delgada, capturada do microscópio petrográfico com objetiva de 5x, informadas no programa de captura de imagens Leica Application Suite (Versão 2.0.0).

3.2.1.1.1 Imagens de microscópio eletrônico de varredura

A utilização de imagens geradas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) mostra-se especificamente adequada para o caso do folhelho, onde o tamanho dos cristais, com valores médios entre 0.003mm e 0.005 mm, não permite que estudos texturais precisos sejam realizados apenas no microscópio petrográfico. A imagem gerada no microscópio eletrônica de varredura representa em tons de cinza o mapeamento de elétrons secundários (SE - *secondary electrons*) e elétrons retro-espalhados (BSE - *backscattering electrons*) emitidos em resposta à incidência de um feixe de elétrons sobre o material analisado.

Os experimentos e análises envolvendo microscopia eletrônica foram realizados no Centro de Microscopia da UFMG, com microscópio eletrônico de varredura com canhão de emissão por efeito de campo, modelo Quanta 200 - FEG - FEI -2006 (Figura 3.16). O equipamento possui acoplado um detector de raios X por espectroscopia por energia dispersiva (*energy dispersive spectroscopy*-EDS).



Figura 3.16 - Microscópio Eletrônico de Varredura com canhão de emissão por efeito de campo modelo Quanta 200 - FEG - FEI - 2006, do Centro de Microscopia da UFMG (Fonte: http://www.ufmg.br/microscopia/images/stories/images/quanta_200feg.jpg capturada em 2011-07-12).

A fase de preparação das amostras constituiu uma etapa importante no processo. Segundo Maliska (2004), a superfície da amostra deve ser plana e altamente polida, pois irregularidades na superfície da amostra podem influenciar a interação dos elétrons e a propagação dos raios X e assim alterar os resultados das leituras. Por isso, as seções polidas foram preparadas com procedimento padrão para observação no microscópio petrográfico e submetidas a polimentos adicionais, para serem lidas no microscópio eletrônico de varredura. Inicialmente as seções foram polidas com uma suspensão de sílica coloidal de 0.05 μm e pH de 9.8, da Allied (especificação técnica: 0.05 μm *Blue Colloidal Silica*), por um período de 4 horas, distribuídas em 1 hora a cada dia. Este procedimento foi realizado em uma politriz Techprep 12”, no Centro de Microscopia da UFMG. Na sequência, as seções polidas foram submetidas a polimento com lixas especiais, em uma sequência de cinco granulações diferentes (conforme apresentado na Tabela 2.1). Segundo catálogo da Allied (*Allied High Tech Products Inc.*, 2008-2009), os filmes de polimento de diamante consistem de partículas de diamante classificados com precisão e ligados por resina a uma película de poliéster; que proporcionam excelente retenção de borda e mantêm coplanariedade independentemente da diversidade de materiais ou dureza da amostra. Este último aspecto foi particularmente importante na preparação das seções polidas, visto que uma dificuldade que havia sido levantada inicialmente era a grande variação de dureza dos minerais: em uma mesma amostra de xisto foram identificados filossilicatos com dureza entre 2 a 3, carbonatos com valores entre 3 a 4, feldspatos com dureza 6 e quartzo com dureza 7. O polimento final foi feito com sílica coloidal de 0.05 μm (*Allied Blue Colloidal Silica*) diluída em água destilada a uma proporção de 40%, por duas horas. A fase de polimento final das seções polidas foi conduzida por pesquisadores do Centro de Microscopia da UFMG.

Tabela 3.1 - Esquema de polimento final de seções polidas com utilização de lixas ultrafinas, para leitura no microscópio eletrônico de varredura.

Etapas	1	2	3	4	5
Granulação da lixa	30 μm	9 μm	3 μm	1 μm	0.5 μm
Tempo (minutos)	190	90	50	60	60

Durante o processo de varredura, à medida que o feixe de elétrons incide sobre a amostra, regiões não condutoras podem acumular cargas negativas, quando o número de elétrons que deixam a amostra é menor que o número de elétrons que incidem sobre ela. Esse fenômeno, conhecido como carregamento, está normalmente associado a amostras não condutoras e que não foram cobertas por um material condutor (Reed, 1993). Uma grande quantidade de cargas negativas pode afetar a eficiência do detector de elétrons ao produzir

regiões escuras em torno das áreas muito carregadas (Maliska, 2004). Na Figura 3.17, exemplo deste fenômeno em imagem de MEV/BSE realizada como teste em seção polida de um dos xistos do conjunto estudado. O litotipo empregado no teste é constituído essencialmente por minerais não condutores e a imagem da varredura exibe faixas escuras que correspondem às regiões carregadas. A maneira mais eficiente e mais usada para evitar o carregamento da amostra é através do depósito de uma fina camada de um material condutor como Au, Ag ou C. Como as rochas investigadas são compostas predominantemente por minerais não condutores de corrente elétrica, para serem analisadas no MEV/EDS, as seções polidas foram metalizadas, por precipitação a vácuo de uma película micrométrica de ouro.

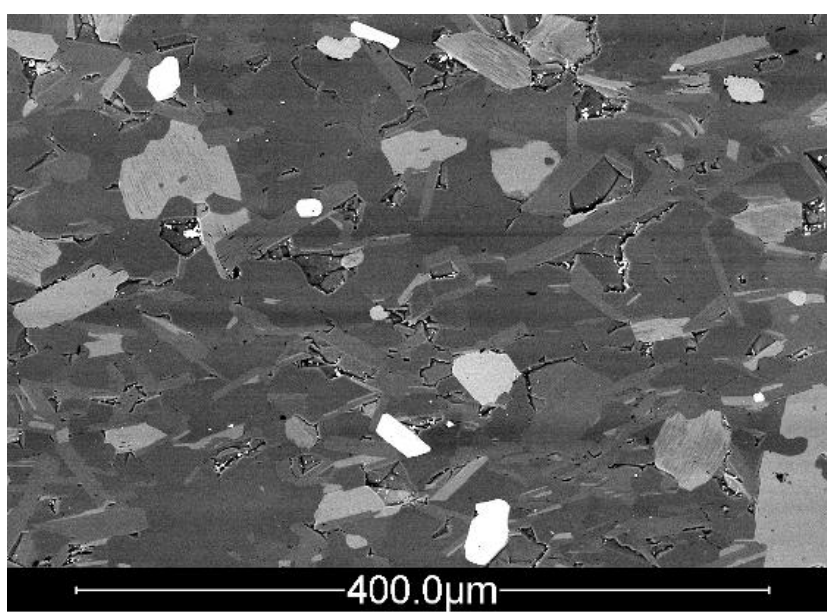


Figura 3.17 - Imagem de varredura eletrônica por BSE, em seção polida não metalizada de xisto coletado próximo à cidade de Araçuaí (NE de Minas Gerais).

A identificação das fases minerais foi realizada em imagens geradas por varreduras com difração de elétrons retro-espalhados - BSE. O mecanismo de contraste mais importante do BSE é o contraste de composição, pois o coeficiente de emissão η dos elétrons retro-espalhados está diretamente relacionado com o número atômico. Esta correlação foi demonstrada por Heinrich (1966, apud Maliska, 2004), conforme ilustrado na Figura 3.18, onde o coeficiente de emissão η dos elétrons retro-espalhados aumenta com o número atômico da amostra bombardeada. O mesmo não ocorre com os elétrons espalhados (SE). O mecanismo de contraste por composição dos elétrons retro-espalhados é mais elevado para materiais com baixo peso atômico, conforme pode ser observado pela inclinação da curva $\eta \times$ peso atômico. Projetando esses resultados para o peso molecular das principais fases minerais constituintes das rochas estudadas, onde predominam os silicatos, pode-se prever um bom contraste nas imagens.

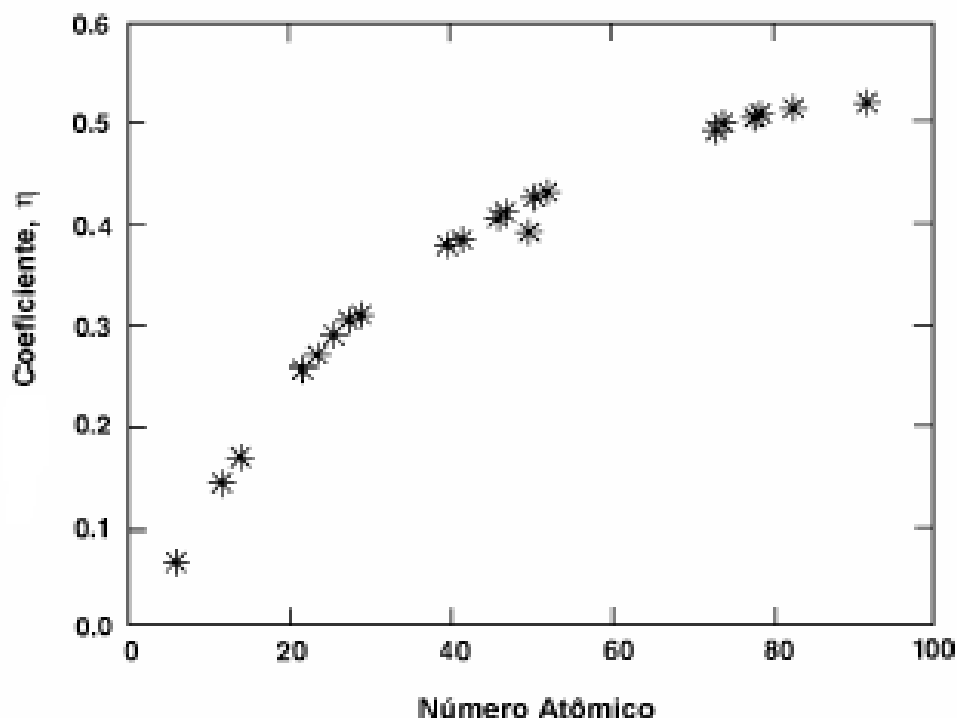


Figura 3.18 - Gráfico de variação do coeficiente de emissão η com o número atômico (Heinrich, 1966 apud: Meliska, 2004).

A segmentação dos cristais baseou-se, portanto, na variável peso atômico, lida pelo BSE, que gera imagens onde as diferentes intensidades de cinza refletem variações de pesos atômicos, que por sua vez estão associados a fases minerais distintas.

O detector de raios X por espectroscopia por energia dispersiva (*energy dispersive spectroscopy*-EDS) acoplado ao MEV oferece duas opções de leitura: uma leitura pontual, que identifica os elementos químicos presentes em uma região pequena associada a um mineral específico, e um mapa composicional de elementos químicos, que faz a varredura em uma área relativamente maior. No equipamento utilizado, a resolução das imagens dos mapas de EDS estava limitada a 256 por 200 pixels. Com essa resolução baixa, para conseguir individualizar cristais, a varredura precisa ser feita com uma magnificação alta para os padrões petrográficos, o que resulta em uma área muito restrita. Como teste, realizou-se varredura de uma região de uma seção polida do folhelho, com magnificação de 4000x, que gerou um mapa com poucos micrones (58 μ m x 74 μ m) e com um número muito pequeno de cristais, sem significado estatístico, como ilustrado nas Figuras 3.19.a-c. As Figuras 3.19.a-b mostram respectivamente os mapas dos elementos Fe e Al e a Figura 3.19.c exibe a imagem binária com cristais de clorita representados em branco. Esta imagem foi gerada por segmentação por limiarização, a partir da combinação dos mapas de Fe e Al. Os cristais de clorita foram identificados por seleção de intervalos de intensidade dos pixels de Al e Fe. O

procedimento de geração do mapa de clorita foi realizado por programação no sistema Matlab®.

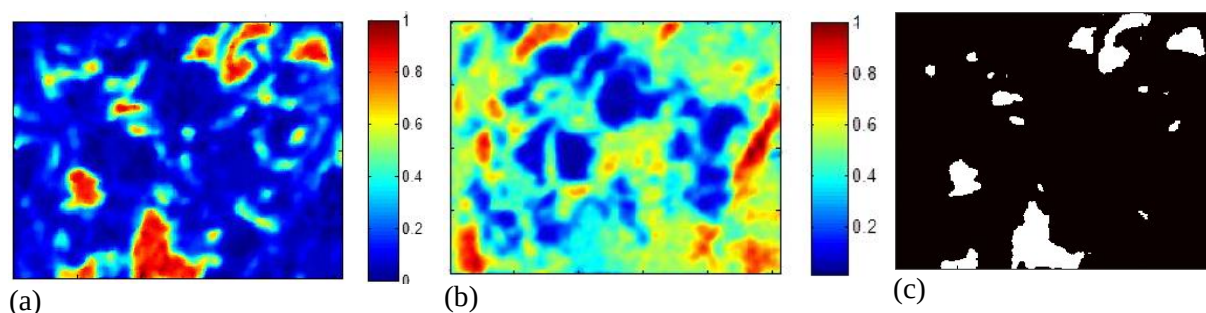


Figura 3.19 - Imagens de seção polida de folhelho no MEV: mapas de EDS, magnificação de 4000x, 58 μm x 74 μm , com os níveis de intensidade dos elementos Fe (a) e Al (b); mapa de cristais de clorita detectados pela combinação dos mapas de elementos químicos Fe e Al (c).

Em função da limitação de área de varredura, os mapas químicos do EDS foram realizados com magnificação mais baixa, com o objetivo de auxiliar a identificação de distribuição dos minerais na amostra. A Figura 3.20 mostra o mapa do elemento Ca, sobreposto à imagem de elétrons secundários SE, onde podem ser observadas em vermelho as regiões de maior concentração desse elemento. Esse mapa foi realizado com magnificação de 100 vezes, com uma área de 2973 μm por 2323 μm .

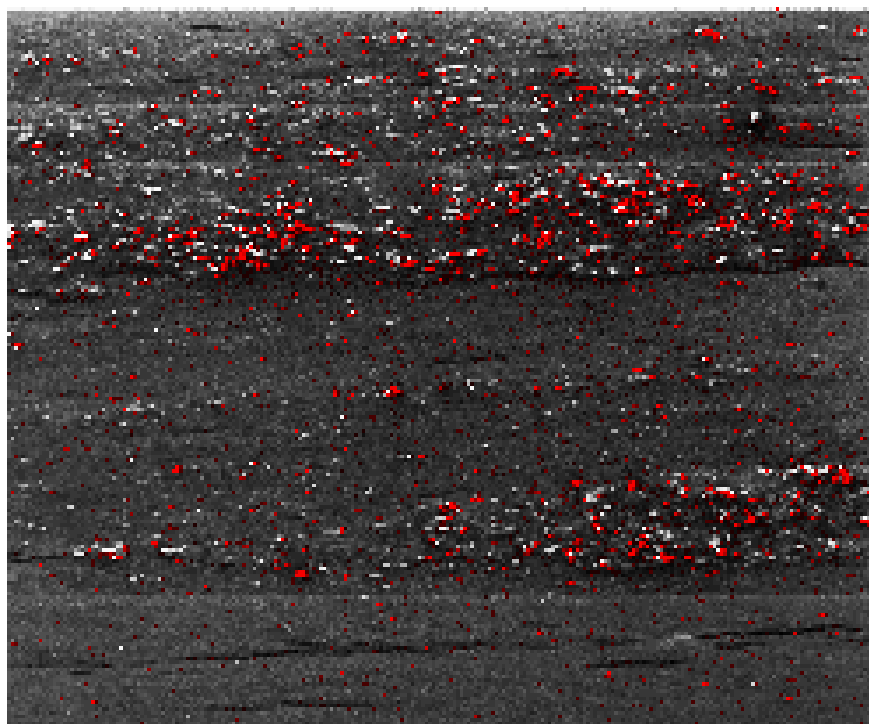


Figura 3.20 - Imagem de seção polida de folhelho no MEV: mapa do elemento Ca por EDS, representado em vermelho, sobreposto à imagem de elétrons secundários (SE), magnificação de 100x, área de 2973 μm por 2323 μm .

Considerando nos mapas de EDS as limitações de imagens com 256x200 pixels, que exigem uma magnificação grande para que os limites entre os cristais possam ser detectadas, eles não foram empregados com o objetivo de gerar imagens, que permitissem a individualização de cristais. Optou-se pelo uso das imagens de retro-espalhado BSE, que refletem as variações do peso atômico de cada fase mineral nas intensidades de cinza. Para o folhelho, a magnificação de 1000x, relativamente baixa para os padrões de microscopia eletrônica, mostrou-se adequada para permitir a individualização dos cristais. A Figura 3.21.a apresenta o mapa geral gerado por elétrons retro-espalhados BSE.

Como fonte de informação adicional, foram realizadas leituras pontuais de EDS, onde as fases minerais foram identificadas por interpretação dos espectros resultantes de análises de caráter qualitativo, com a identificação dos elementos químicos presentes por microanálises por energia dispersiva (EDS). Uma vez identificados os minerais da imagem, para efeitos de classificação procedeu-se a uma associação entre o tom de cinza e a fase mineral. Assim os cristais de quartzo apresentam as tonalidades mais baixas, os cristais de mica, tons intermediários de cinza e os cristais de clorita, que por seu conteúdo em Fe e Mg têm peso atômico maior, os tons mais claros. Com os maiores pesos atômicos foram identificados cristais de titanita, que se destacam como os minerais mais claros na imagem de BSE. A Figura 3.21.a mostra o mapa de BSE e a Figura 3.21.b um detalhe da mesma imagem, onde estão identificados os minerais quartzo, clorita, moscovita e titanita. As Figuras 3.21.c-f mostram os espectros de leituras pontuais de EDS das respectivas fases minerais, com os picos dos elementos constituintes.

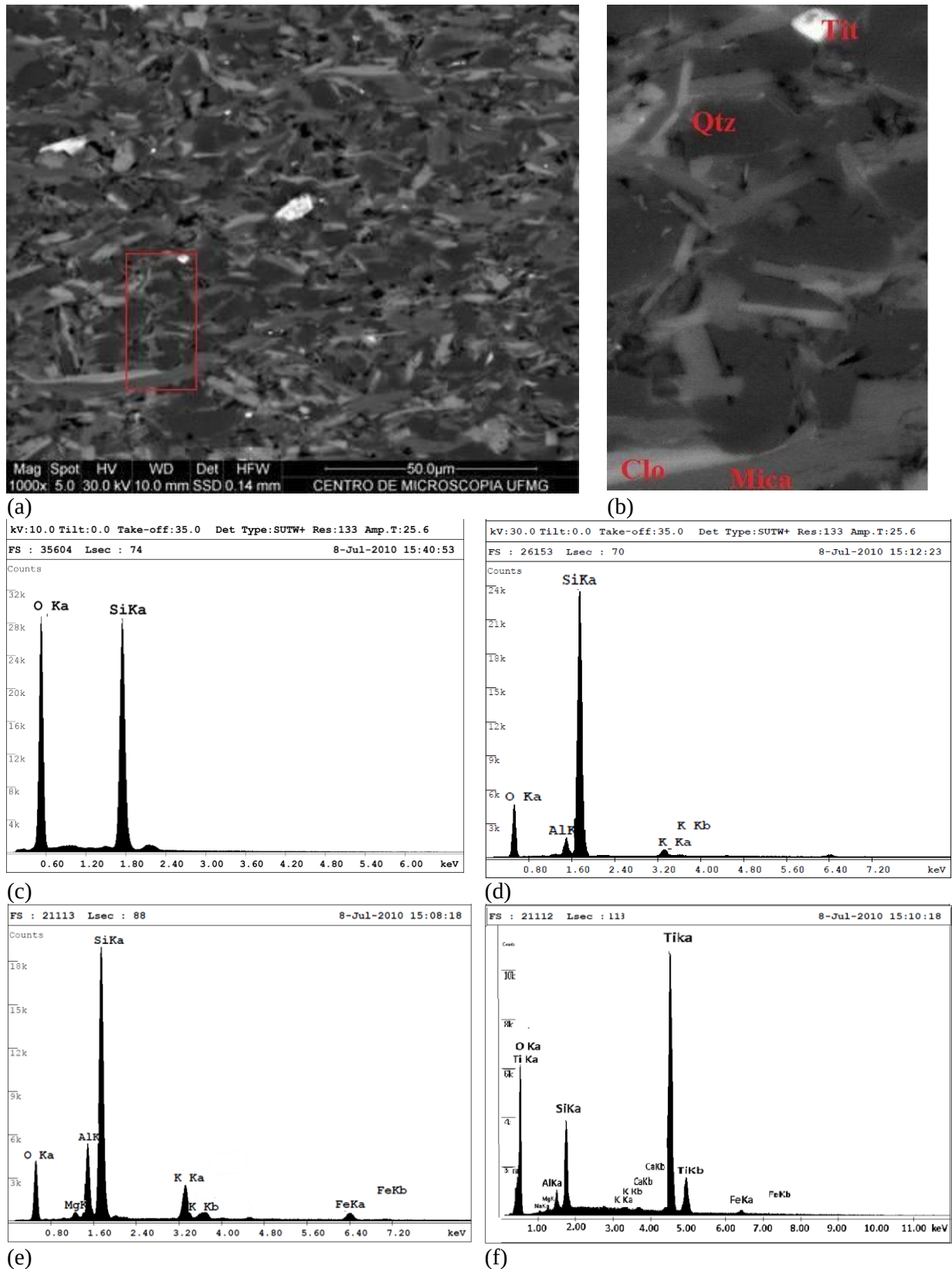


Figura 3.21 - Leituras no MEV de seção polida de folhelho: imagem de BSE, magnificação de 1000x, 140 μm x 140 μm (a) e detalhe da mesma região com minerais quartzo-Qtz, moscovita-Mica, clorita-Clo e titanita-Tit identificados em vermelho (b); espectros de leituras por energia dispersiva EDS com picos dos elementos constituintes do quartzo (c); moscovita (d); clorita (e) e titanita (f).

A separação das fases minerais foi realizada no sistema Matlab®, por meio de técnica

de limiarização, que comparou intervalos de intensidade de cinza, associados a uma determinada fase mineral, previamente reconhecida por leituras locais de EDS. As Figuras 3.22.a-c apresentam imagens classificadas de quartzo, moscovita e clorita; os respectivos histogramas de intensidade dos pixels estão representados nas Figuras 3.22.d-f.

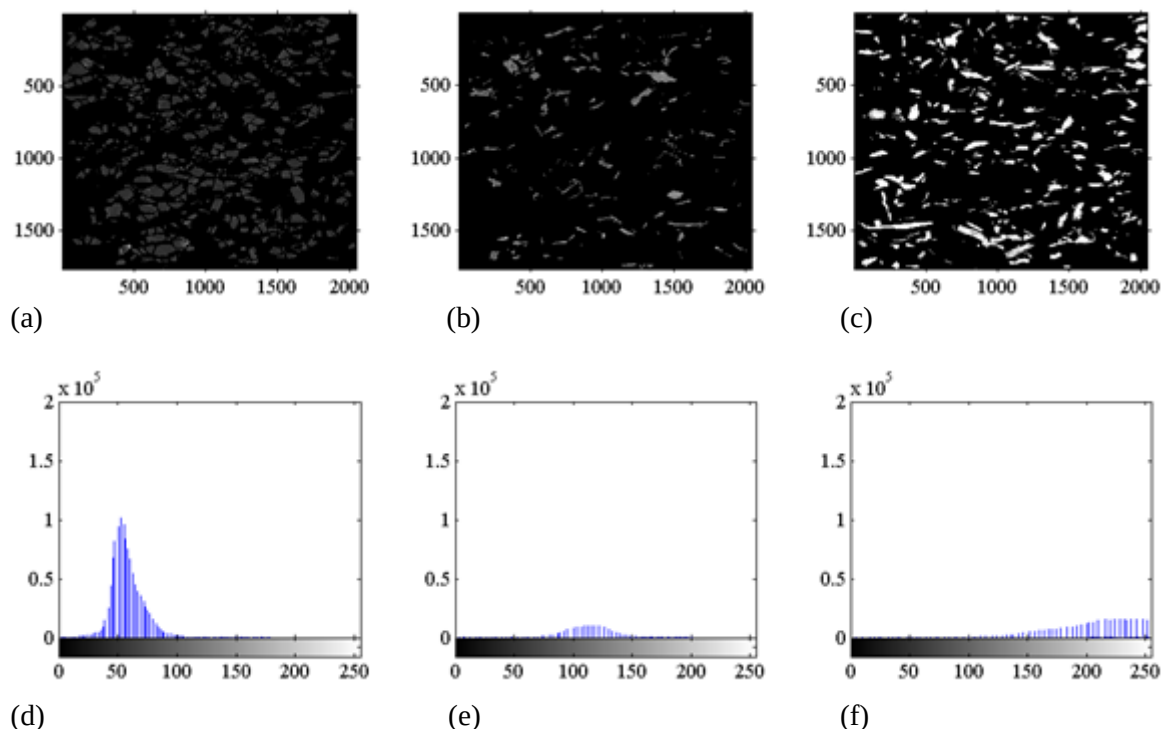


Figura 3.22 - Imagens classificadas das fases minerais quartzo (a); moscovita (b) e clorita (c) a partir de imagem capturada no MEV/BSE, com os respectivos histogramas de intensidade dos pixels.

3.2.1.1.2 Imagens por microscopia de luz polarizada

As imagens das lâminas delgadas foram capturadas no microscópio petrográfico Zeiss Axiophot com a utilização de uma câmera Leica EC3 e armazenados pelo programa *Leica Application Suite V2.0.0*. Os arquivos foram salvos em formato TIFF (*Tagged Image File Format*), padrão para memorização e processamento de imagens, pois conservam os três canais dos componentes vermelho, verde e azul do modelo de cores RGB. Não foram usados arquivos com formatos do tipo JPEG, pois a operação de compressão altera os valores dos dados (Bonduá, 2002).

Para cada um dos seis litotipos, que compõem o conjunto que utilizou fotomicrografias do microscópio petrográfico, foram capturadas imagens com nicóis cruzados e descruzados e com diversas magnificações. De acordo com o tamanho médio dos grãos, para algumas rochas foram selecionadas imagens capturadas com lentes objetivas de 2.5x e outras com lentes objetivas de 5x e de 10x. Nos xistos de Itinga, Araçuai e Serro, que possuem tamanho médio dos cristais maiores ou um intervalo maior de tamanhos, foram trabalhadas imagens capturadas com objetiva de 2.5x. O xisto de Caeté foi trabalhado com

imagens capturadas com objetiva de 5x em função das variações de tamanho de cristais de carbonato e quartzo. Os xistos de Passagem de Mariana e Sabará foram trabalhados com imagens capturadas com objetivas de 10x. Para favorecer a comparação entre as diferenças de tamanho dos cristais, as imagens ilustradas nas Figuras 3.23.a-f estão todas na mesma escala.

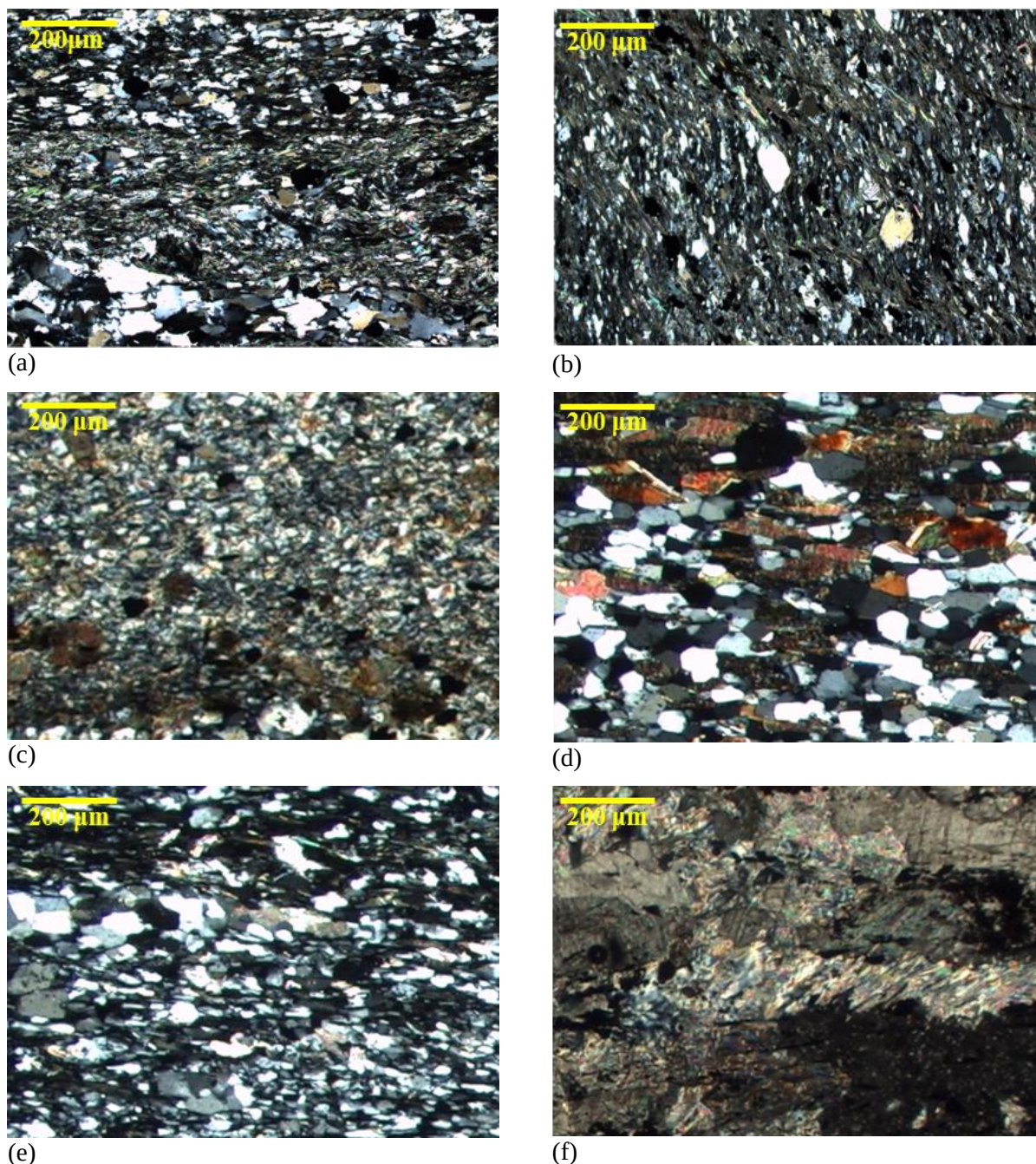


Figura 3.23 - Fotomicrografias em nicóis cruzados: xistos peraluminosos do Quadrilátero Ferrífero, coletados próximo às cidades de (a) Sabará e (b) Mariana; xistos peraluminosos da região do Médio Jequitinhonha, coletados próximo às cidades de (c) Araçuaí e (d) Itinga; (e) xisto verde do Quadrilátero Ferrífero, coletado próximo à cidade de Caeté ; (f) xisto ultramáfico da região da Serra do Espinhaço Meridional, coletado próximo à cidade de Serro.

3.2.1.1.3 Feições macroscópicas medidas em chapas

Do mesmo modo como foi realizada para o padrão textural em escala microscópica, a avaliação das feições macroscopicamente identificáveis foi realizada para definir os tamanhos dos objetos (minerais, nódulos e fragmentos líticos), suas variações e o padrão de distribuição espacial. As determinações desses objetos foram realizadas em chapas serradas, cujas imagens foram fotografadas ou capturadas em um scanner. O método de captura foi definido pelo tamanho dos objetos em análise. Assim, rochas com feições centimétricas foram fotografadas e aquelas com feições milimétricas, foram *scanneadas*. As imagens foram capturadas em scanner modelo *HP Photosmart C4180*, com resolução de 300 dpi. Os limites dos grãos foram desenhados sobre as imagens no editor de imagens *Adobe Photoshop Elements 6.0®*. Cores distintas foram atribuídas às diferentes classes e posteriormente separadas no sistema *Matlab®*, como as sequências ilustradas nas Figuras 3.24.a-c e Figuras 3.24.d-f.

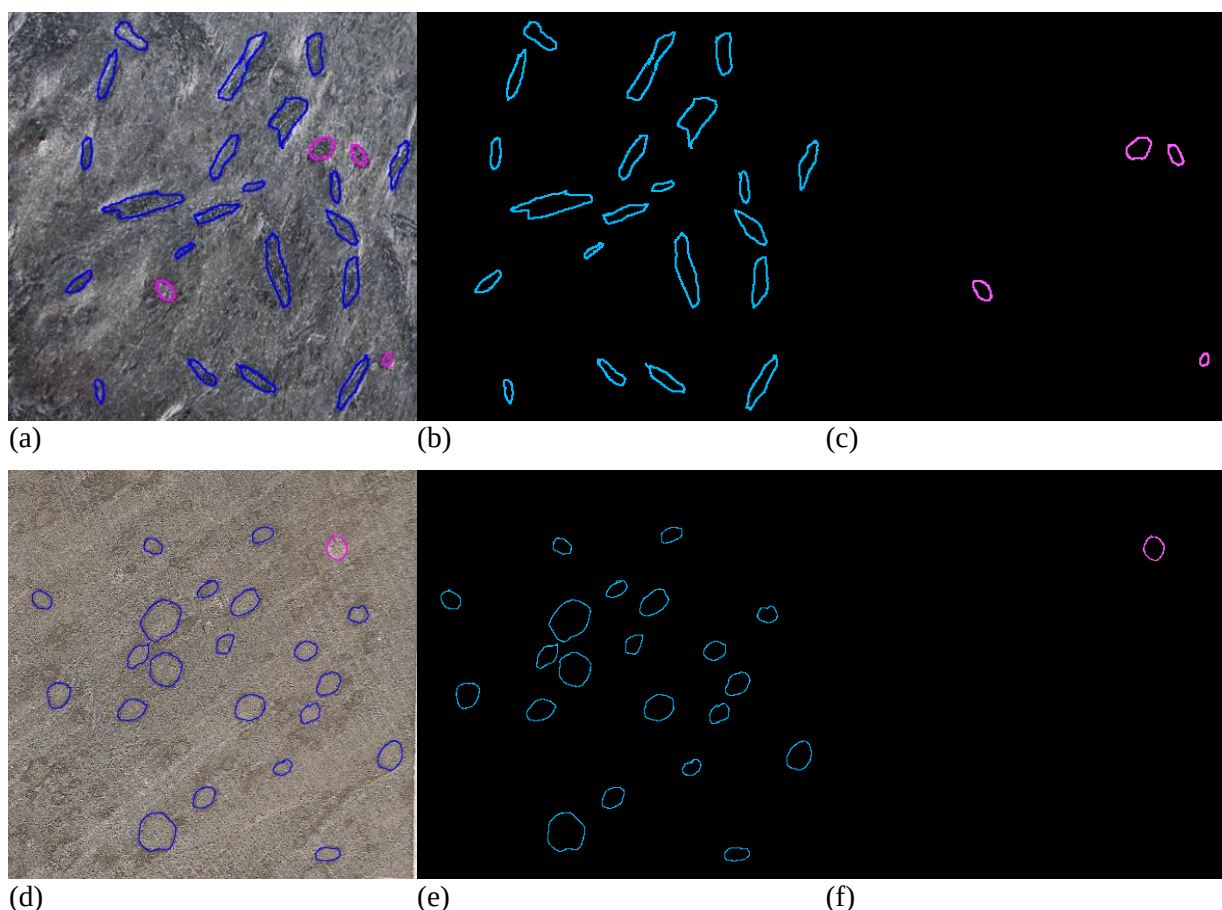


Figura 3.24 - Imagens de chapas de rochas com feições macroscópicas: (a) fotografia de chapa de 30 x 30 cm onde foram traçados limites de porfiroblastos de andaluzita (linhas azuis) e de cordierita (linhas rosa); (b) imagens resultantes da seleção dos porfiroblastos de andaluzita e (c) e cordierita; (d) imagem capturada no scanner, detalhe de área de 3 x 3 cm, com nódulos (linhas azuis) e granada (linha rosa); (e) imagens resultantes da seleção dos nódulos e (f) da granada. Nas imagens iniciais (a e d), há objetos que não foram marcados, para favorecer a observação.

3.2.1.1.4 Processamento digital de imagens - etapa de segmentação

As imagens digitais foram inicialmente segmentadas em um processo de separação de cada uma das fases minerais presentes nas rochas em arquivos distintos. Assim, a partir dessas imagens, realizaram-se procedimentos de individualização dos cristais, com definição de contornos dos grãos. Uma vez definidos os grãos, foi possível medir as propriedades geométricas de cada uma das principais fases minerais.

A segmentação consiste na classificação de uma imagem em regiões com propriedades similares, de acordo com um critério pré-definido (Gonzalez *et al.*, 2004). A escolha do método para efetuar a segmentação depende das propriedades contidas na imagem de origem e de qual variável pretende-se classificar. A eficiência da operação de segmentação é influenciada por aspectos relacionados à entropia (medida estatística de aleatoriedade) e variações de intensidade dos pixels que compõem a imagem. Segundo Gonzalez *et al.* (2004), o nível de subdivisão da imagem depende do problema a ser resolvido. Portanto é preciso avaliar o que se espera como resposta da classificação, para melhor definir os procedimentos. Há vários métodos de segmentação de imagens. Na presente investigação, foi empregada a limiarização (*thresholding*), onde as classes são definidas por limites de valores dos pixels, e a segmentação por análise grupal (*cluster analysis*), onde as classes são agrupadas em função de similaridades e dissimilaridades dos dados observados.

Segmentação com fotomicrografias

A análise de imagens petrográficas para a classificação de fases minerais, tanto em analisadores automáticos de imagens como em programas que utilizam técnicas de processamento digital de imagens, está sujeita a erros. A análise automática de imagens apresenta limitações pelas propriedades ópticas dos cristais, presença de maclas e clivagens e por feições secundárias nos grãos, como fraturas e alterações minerais (Přikryl, 2006). Segundo o autor, um analisador de imagens pode considerar que duas fases minerais têm a mesma cor, como o quartzo e o feldspato em determinadas posições e, neste caso, as duas fases não são corretamente separadas. Por outro lado, a presença de feições secundárias pode ser confundida com fronteira de grãos. Em função dessas peculiaridades, optou-se por uma abordagem onde as especificidades de cada litotipo fossem levadas em consideração, com aplicação de procedimentos próprios. Optou-se pelo tratamento dos dados com uso combinado de um editor de imagens - *Adobe Photoshop Elements 6.0®* - e pelo sistema *Matlab®*.

A classificação das imagens em fases minerais seguiu duas diretrizes essenciais,

buscando maior eficiência. A primeira foi restringir a individualização das classes naquelas mais relevantes em termos texturais e/ou com maior contraste visual. Porfiroblastos e minerais presentes em menor percentual nas rochas foram medidos com procedimentos à parte. A segunda diretriz foi adaptar os procedimentos de acordo com as propriedades ópticas dos minerais, fazendo uso da combinação de imagens com nicóis cruzados e nicóis descruzados.

Em termos de relevância para a análise textural, os principais minerais contidos nos xistos investigados são a clorita, as micas, o quartzo, o feldspato, os carbonatos e os porfiroblastos de andaluzita e cordierita. Em todas as imagens, inicialmente foram excluídos da classificação os pixels referentes aos minerais opacos. No conjunto de rochas avaliado, a biotita e a clorita têm cores bem definidas em relação aos demais minerais transparentes e essa foi a propriedade escolhida para a primeira fase de classificação.

A imagem em nicóis descruzados foi escolhida para a classificação inicial das fases, porque nos nicóis cruzados a diversidade das cores de interferência dos filossilicatos poderia levar a uma segmentação excessiva. Inicialmente, com base em suas cores, foram marcados os pixels correspondentes aos cristais de biotita e/ou clorita. Em etapas sucessivas, as outras classes de fases minerais foram subdivididas conforme a necessidade de cada litotipo.

Os procedimentos de segmentação basearam-se em diferenças de cores e foram adaptados de exemplo existente no sistema Matlab®. Para a separação das classes, inicialmente a imagem foi convertida de RGB para o espaço de cores $L^*a^*b^*$. Uma imagem de cores verdadeiras RGB é representada por uma matriz de três dimensões, onde cada pixel tem os componentes vermelho-R, verde-G e azul-B. O espaço de cores $L^*a^*b^*$ é composto por três componentes: luminosidade L^* ; cores no eixo vermelho-verde a^* ; e cores no eixo azul-amarelo b^* (Mathworks, 2010). A transformação foi realizada com o objetivo de aumentar o contraste entre valores dos pixels, pois os componentes a^* e b^* têm correlação mais baixa que os componentes de cores RGB (vermelho, verde, azul). Foram utilizadas as funções `|makecform|` e `|applycform|` do sistema Matlab®.

Com os dados transformados, procedeu-se à classificação da imagem.

Para a classificação, as imagens foram transformadas em vetores, cada pixel com sua intensidade. O procedimento empregado foi a análise grupal (*cluster analysis*), que se baseia nas similaridades e dissimilaridades entre observações ou objetos: cria grupos tais, que objetos em um mesmo grupo são os mais similares e objetos em grupos diferentes são os mais distintos (Mathworks, 2010). Os grupos mutuamente distintos foram calculados pelo método de partição *k-means*. Na imagem convertida, todas as informações de cores estão nos

componentes 'a*' e 'b*' e diferenças entre as cores foram medidas pela distância métrica Euclidiana. Empregou-se a função matemática `|kmeans|` do sistema Matlab®, que trata cada pixel como um objeto com localização espacial e encontra a partição na qual objetos de um mesmo grupo são o mais próximo possível entre eles e o mais distante possível de objetos de outros grupos e retorna um vetor com um índice de grupo para cada pixel. A cada pixel da imagem original foi atribuída uma cor associada a uma determinada classe, gerando uma nova imagem classificada nas fases minerais. Após a classificação, a imagem foi convertida de volta para as cores RGB. Como as imagens são matrizes onde a cada pixel corresponde um índice $[i,j,k]$, onde i, j definem sua posição (linha,coluna) e k contém os três canais de cores RGB, ao final da rotina, os pixels classificados da imagem capturada com nicóis descruzados foram projetados na imagem capturada com nicóis cruzados.

Assim, com base nos principais minerais constituintes de cada rocha, que apresentam o melhor contraste de cor nos nicóis descruzados, foram classificadas as imagens de cada litotipo.

No xisto amostrado próximo à região de Itinga, foram individualizadas imagens de cristais de biotita e quartzo.

No xisto amostrado próximo à idade de Araçuaí a primeira classificação separou os cristais de biotita, de clorita e de quartzo.

A primeira fase da classificação dos xistos de Passagem de Mariana e Sabará separou a imagem em duas classes: uma com cristais de clorita e outra com quartzo e moscovita.

No xisto verde coletado próximo à cidade de Caeté foram individualizadas uma classe de cristais de clorita e uma classe de cristais de quartzo-feldspato-carbonato.

Após a classificação automática, foram necessários pós-processamentos, para melhor definir as populações dos minerais.

As figuras a seguir ilustram as etapas de classificação.

Nas Figuras 3.25.a-b estão as imagens originais em nicóis descruzados e nicóis cruzados, respectivamente. As Figuras 3.25.c e 3.25.d representam as imagens em nicóis descruzados, já classificadas em biotita (Figura 3.25.c) e quartzo (Figura 2.25.d). Nas Figuras 3.25.e 3.25.f estão as mesmas classes projetadas nas imagens com nicóis cruzados. As Figuras 3.25.g-h representam a segunda fase da classificação, com separação dos grãos de cada fase mineral.

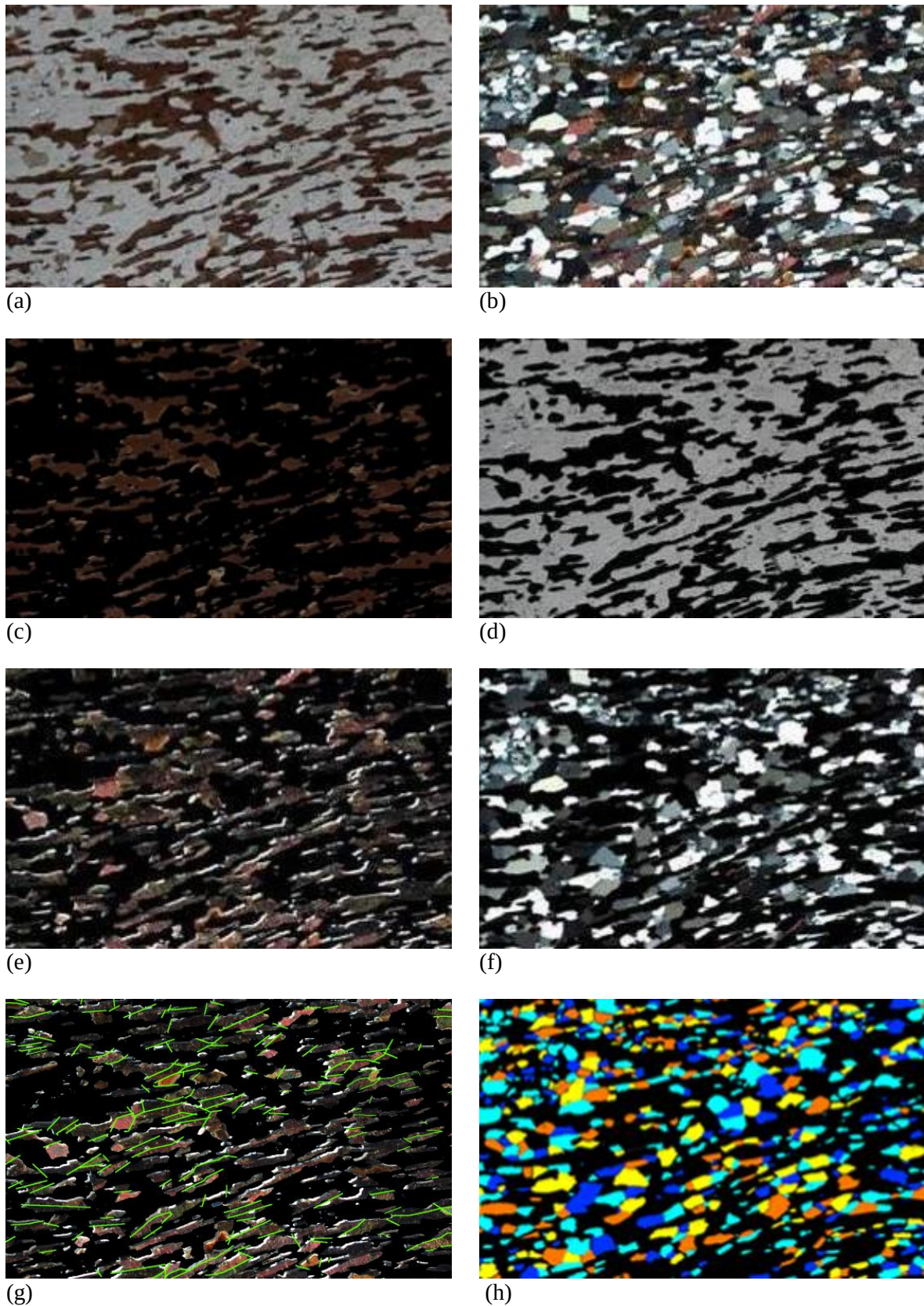


Figura 3.25 - Etapas de segmentação de fotomicrografias: (a) detalhe de imagens de xisto peraluminoso, objetiva de 2,5x, nicóis cruzados e (b) nicóis descruzados; (c) etapa 1- segmentação em nicóis descruzados com separação de imagens de biotita e (d) quartzo , (e) etapa 2- segmentação em nicóis cruzados por projeção de imagens da etapa1 de biotita e (f) quartzo ; (g) etapa 3- definição de cristais individuais de biotita e (h) quartzo.

A segunda etapa da segmentação visou à separação das outras fases minerais. Para os cristais de quartzo, feldspato, carbonato e mica branca a segmentação das fases minerais e a definição dos grãos individuais são possíveis com nicóis cruzados, onde as orientações cristalográficas conferem diferentes tons aos minerais e permitem a detecção de suas bordas. O procedimento de classificação empregado foi a análise grupal, descrito na etapa anterior.

Os xistos do conjunto avaliado têm em comum a presença de filossilicatos clorita e/ou biotita. Nestes minerais, as fronteiras dos grãos adjacentes não são claras com nicóis descruzados e, com nicóis cruzados, a variação de cores de interferência em um mesmo cristal torna complexa e ineficiente a separação automática dos grãos (Figuras 3.26.a-d). Assim, para todas as amostras, fez-se necessário um pós-processamento, onde o reconhecimento dos cristais e a definição de seus limites foram traçados individualmente (Figura 3.25.g).

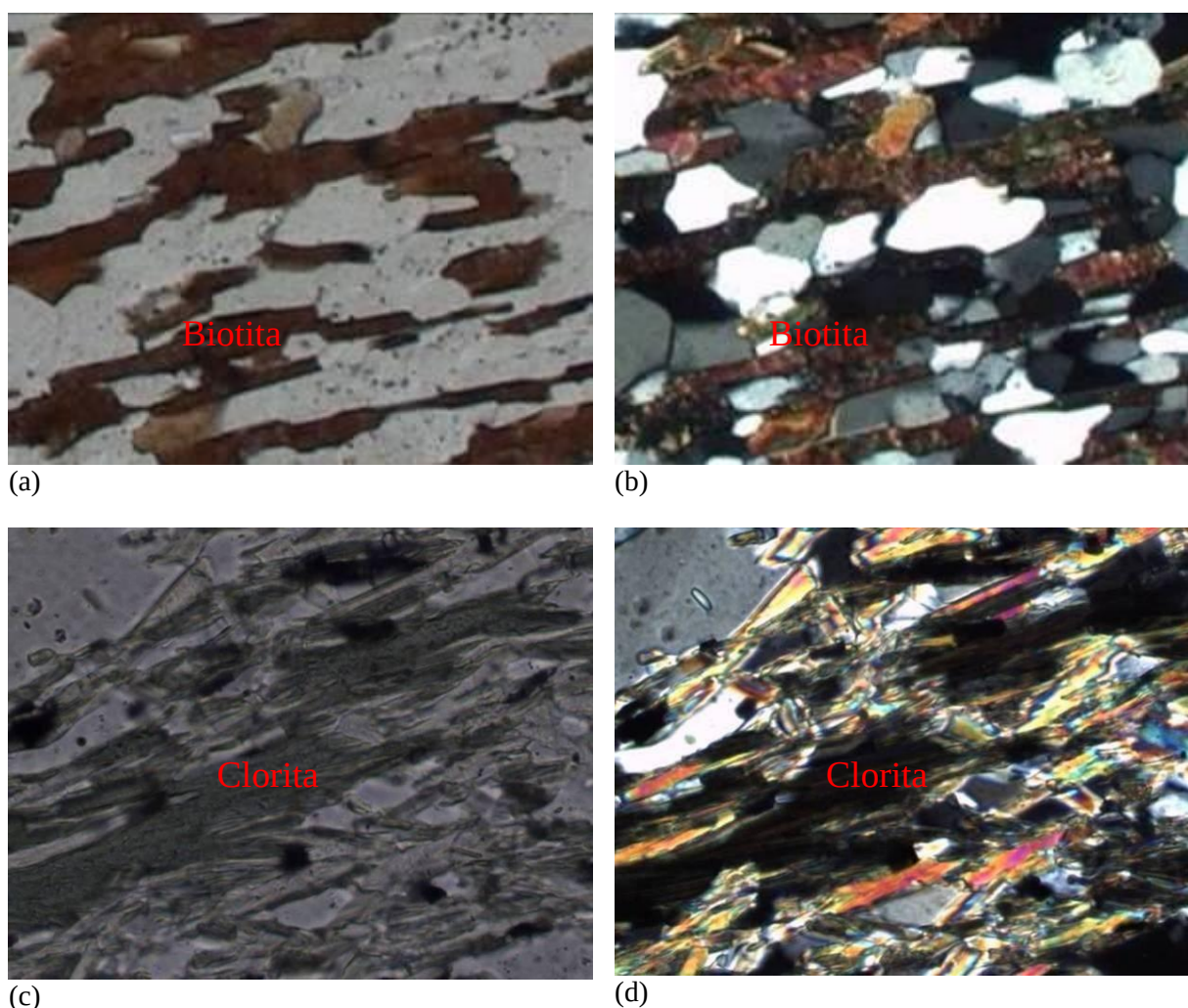


Figura 3.26 - Detalhe de fotomicrografias com (a) cristais de biotita e quartzo em nicóis descruzados e (b) nicóis cruzados; (c) cristais de clorita, moscovita e quartzo em nicóis descruzados e (d) nicóis cruzados.

Na fase final de classificação, as especificidades de cada litotipo exigiram soluções próprias. No xisto de Araçuaí foi realizada a separação dos cristais de biotita em duas populações: uma fase com cristais menores e orientados segundo a foliação, e outra com blastos maiores e mais dispersos em termos de orientação.

Para o xisto máfico de Caeté, manteve-se o procedimento inicial de classificação empregado nas rochas anteriores. Assim, a primeira classificação das fases minerais foi realizada com fotomicrografias capturadas com nicóis descruzados. Pela diferença de cor, foram individualizadas duas classes: a da clorita, com tons verdes, e a dos outros minerais. Os pixels classificados da imagem, capturada com nicóis descruzados, foram projetados na imagem de nicóis cruzados, onde então foram classificadas as demais fases minerais: quartzo, feldspato e carbonato. A Figura 3.27 ilustra uma imagem parcial classificada. A partir das imagens separadas em fases minerais, procedeu-se à individualização dos cristais, com pós-processamento para corrigir erros inerentes ao processo automático. Assim foram corrigidas segmentações excessivas (*oversegmentation*) devido à presença de descontinuidades, como clivagens e maclas nos carbonatos e nos feldspatos; eliminação de buracos por saussuritização nos feldspatos. Os limites dos cristais de clorita foram em grande parte editados, pois nas imagens capturadas com nicóis descruzados eles não aparecem bem definidos e, em nicóis cruzados, o pouco contraste em tons de cinza dos cristais não favorece a separação automática.

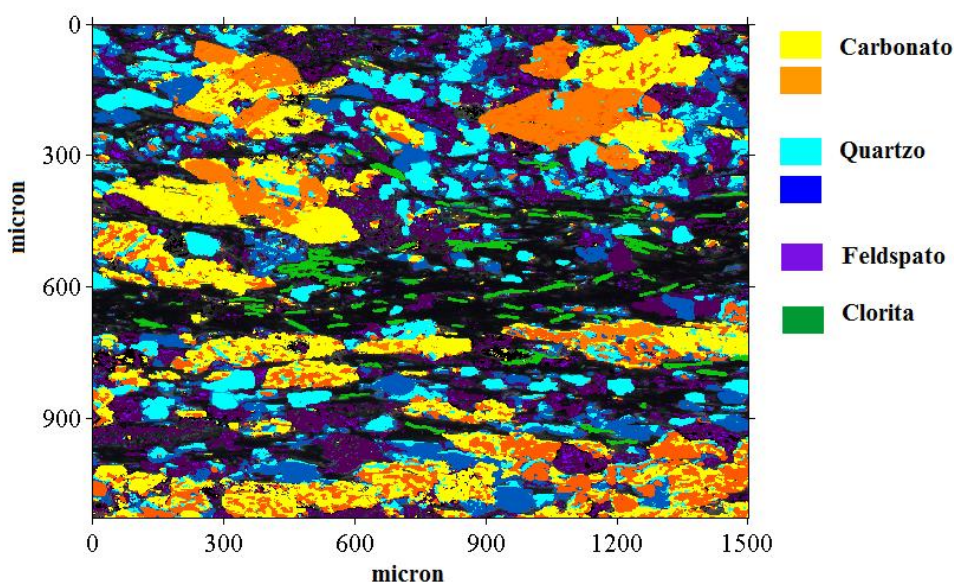


Figura 3.27 - Imagem classificada automaticamente com as fases minerais conforme legenda, xisto verde da região da cidade de Caeté.

No caso específico do xisto ultramáfico de Serro, o procedimento adotado diferiu dos

anteriores, em função de suas características petrográficas. As presenças de cristais de carbonato com muitas inclusões, frequentemente fraturados e com maclas visíveis em nicóis cruzados, juntamente com o mineral talco na forma de massas fibrosas e palhetas, tornam a classificação automática ineficiente. A combinação dos aspectos acima descritos, com o fato de esse xisto ser composto por cristais maiores, levou à opção por traçar os limites dos minerais por inspeção visual em um programa de edição gráfica. Quando imagens complexas precisam ser analisadas, a opção por determinação manual de fronteiras dos cristais é recorrente e recomendada por vários autores, como Siegesmund *et al.*(1994), Pykril (2006), entre outros. A Figura 3.28 ilustra uma imagem parcialmente editada de fotomicrografia em nicóis cruzados, onde os limites dos cristais estão representados em cores sólidas e o restante corresponde a áreas onde os limites ainda não foram traçados. No caso de grãos adjacentes de mesma fase mineral, foram atribuídas cores distintas, para que esses pudessem ser individualizados na etapa seguinte, de cálculo de parâmetros geométricos.

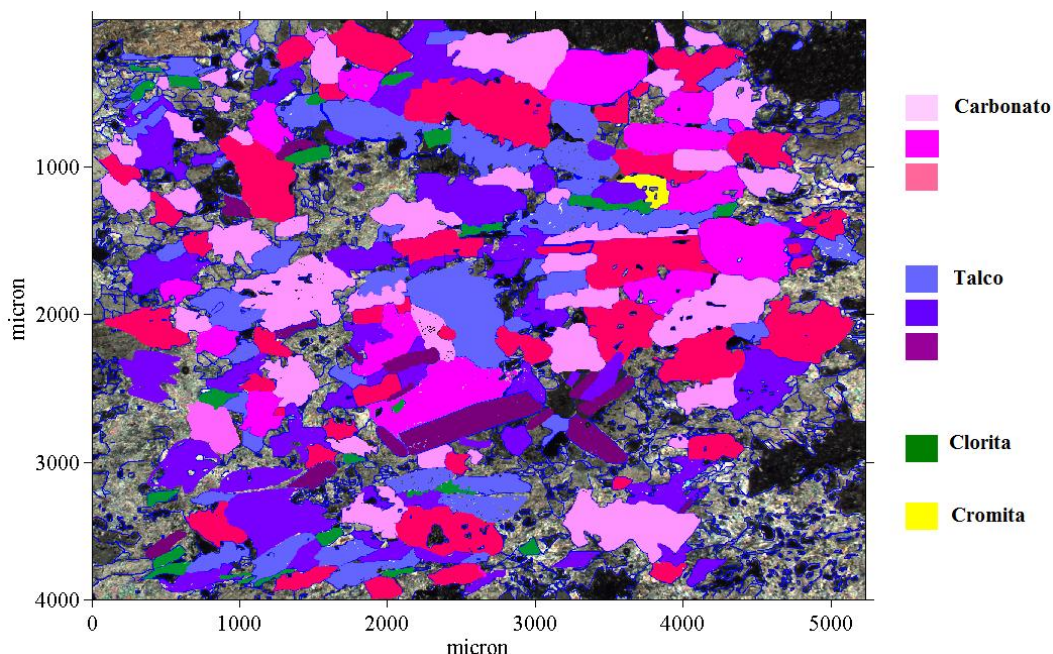


Figura 3.28 - Limites de cristais desenhados sobre fotomicrografia de xisto ultramáfico da região da cidade do Serro.

3.2.1.2 Parâmetros geométricos

Para a avaliação quantitativa da textura das rochas foram medidos os seguintes parâmetros geométricos: tamanho do cristal, comprimento do eixo maior, comprimento do eixo menor e orientação angular. Segundo Higgins (2006), o tamanho de grão tem diferentes definições, entre as quais: a maior distância entre todos os pontos da superfície do grão; o comprimento do menor paralelepípedo circunscrito do grão; o eixo maior do elipsoide de melhor ajuste ao grão. Higgins (2006) observa que as duas últimas definições se aproximam e

aconselha o uso de uma entre elas. Na investigação presente, adotou-se como definição de tamanho do grão o eixo de maior comprimento da elipse circunscritora.

As medições dos parâmetros geométricos foram realizadas com a função `|regionprops|` do sistema Matlab®, que considera para os cálculos cada um dos objetos ou das regiões homogêneas das imagens, ou seja, são considerados objetos individuais as regiões onde os pixels conectados têm o mesmo valor. Foram medidos o tamanho do objeto, definido como o comprimento do eixo maior da elipse, o comprimento do eixo menor e a orientação. A definição de orientação empregada foi aquela que corresponde ao ângulo entre o eixo horizontal x e o eixo maior da elipse, que tem o segundo momento coincidente com o do objeto medido. A orientação é expressa em graus, com valores entre -90 a 90. A Figura 3.29.a ilustra a elipse correspondente ao objeto medido e a Figura 3.29.b, a disposição da elipse e suas feições representadas graficamente em relação ao eixo horizontal.



Figura 3.29 - Ilustração do sistema Matlab® dos eixos e orientação da elipse, com (a) os pixels do objeto representados em branco e sua elipse correspondente em vermelho e (b) a mesma elipse com feições representadas graficamente: linhas azuis são os eixos, pontos vermelhos são os focos e a orientação é o ângulo entre linha horizontal pontilhada e o eixo maior.

A razão de alongamento (*aspecto ratio*) foi calculada pela razão entre o comprimento do eixo maior pelo comprimento do eixo menor do cristal (Howarth & Rowlands, 1986). Para a classificação quanto ao grau de alongamento, Takehara (2004) subdivide os grãos em: alongados, com taxas de alongamento superiores a 2; sub-alongados, cristais com razão de alongamento entre 1,75 e 2,0; sub-granulares, que correspondem àqueles com taxas de alongamento entre 1,5 e 1,75; e granulares, aqueles cristais com razão de alongamento inferior a 1,5. Para o objetivo da presente investigação, foram classificados como alongados os cristais com razão de alongamento superior ou igual a dois; sub-alongados os cristais com razão de alongamento entre 1,5 e 2,0; e cristais não alongados aqueles com razão de alongamento inferior a 1,5. A Figura 3.30 contém ilustração esquemática dos critérios de classificação dos cristais quanto à razão de alongamento.

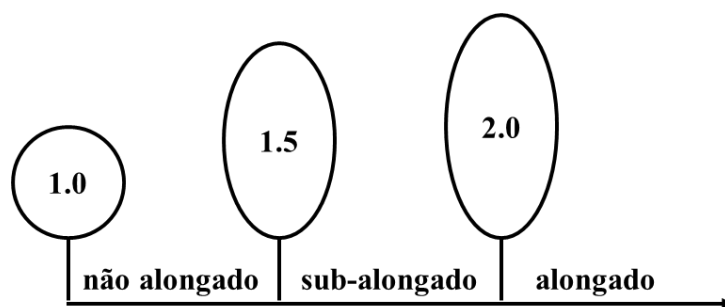


Figura 3.30 - Ilustração esquemática dos critérios de classificação para os tipos de cristais quanto ao alongamento, onde os números representados são os limites da razão de alongamento entre as classes (modificado de Takehara, 2004).

As imagens com origem no microscópio óptico, com modelo de cores RGB, e as imagens com origem no MEV, em escala de cinza, precisaram ser convertidas em imagem binária. Na binarização todos os objetos são convertidos em branco e o fundo da imagem é convertido em preto. Por esta razão, não pode haver grãos adjacentes da mesma fase mineral, pois uma vez que todos os grãos recebem a mesma cor, as diferenças de valor dos pixels, que definem suas fronteiras, deixam de existir e eles se tornam um único objeto, podendo levar a uma superestimação do tamanho de grãos e erros nos parâmetros geométricos de forma geral.

Importante observar que a imagem empregada nos cálculos de parâmetros geométricos já foi classificada em fase anterior de segmentação (item 3.2.1.1.4), de modo que grãos adjacentes têm valores de pixel distintos, conforme ilustrado na Figura 3.31.a. Portanto, o procedimento de binarização é realizado para cada uma das imagens, que foram criadas pela seleção de grãos com mesmo valor de pixel: elas contêm uma única fase mineral e sem grãos justapostos (Figura 3.31.b). O resultado na binarização pode ser observado na Figura 3.31.c.

Para oferecer medições precisas, a imagem binarizada passou por operações de refinamento sucessivas. Os procedimentos foram executados no ambiente do sistema Matlab®, com funções especialistas de tratamento de imagens e operações morfológicas. A imagem binária foi submetida a uma operação morfológica de abertura, para remoção de objetos pequenos. A operação foi realizada com a função `bwareaopen`. Para a definição do menor objeto, foram calculadas as áreas dos cristais pela função `regionprops`. As imagens das Figuras 3.31.c-d ilustram a eliminação dos pequenos objetos. Procedeu-se então ao fechamento de buracos, com a função `imfill`, onde um buraco é definido como uma área de pixels de fundo (*background pixels*) rodeados por pixels da imagem binária. A Figura 3.31.e mostra a imagem binária final e a Figura 3.31.f exibe a mesma imagem, com o valor da orientação do grão escrito em vermelho.

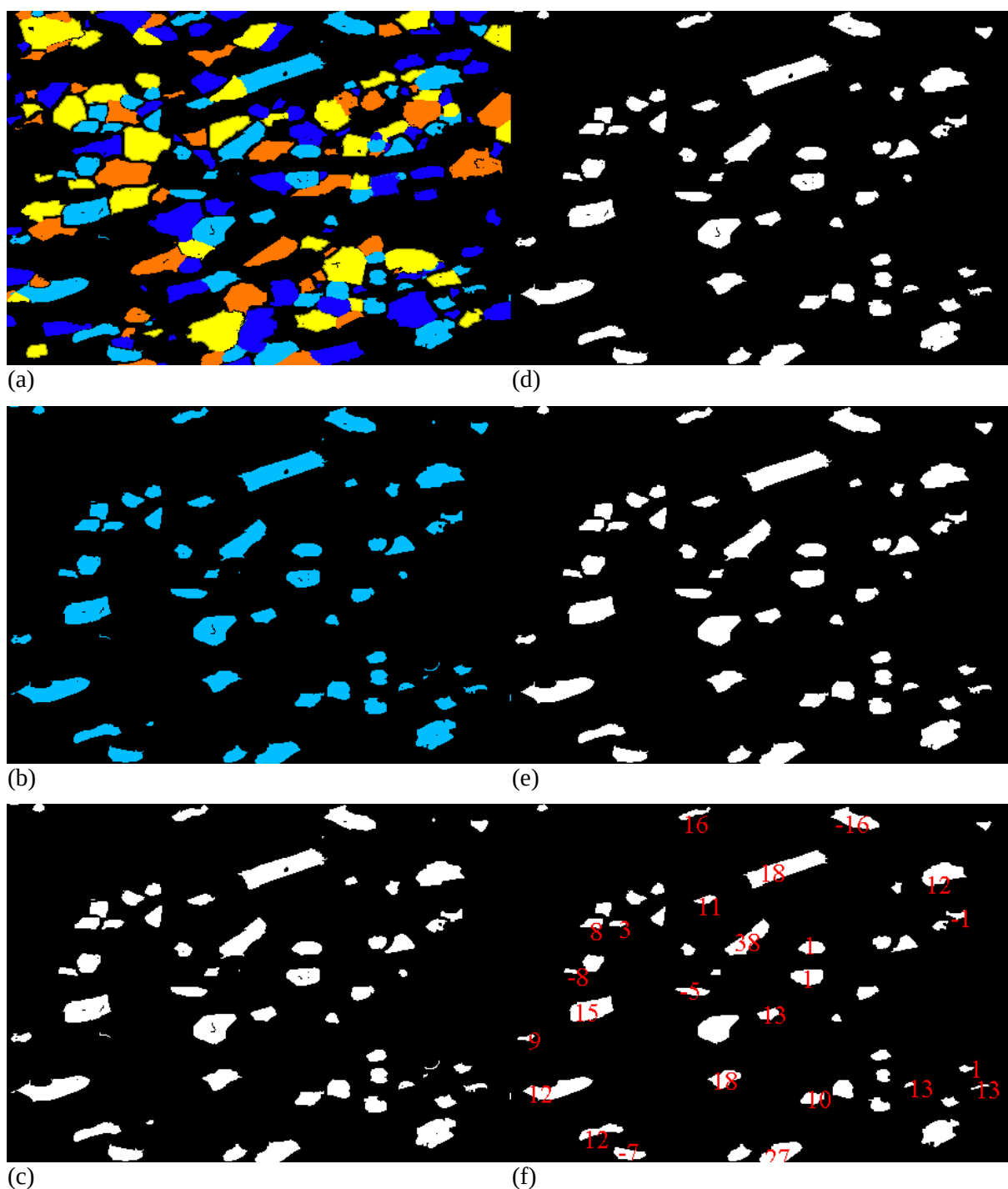
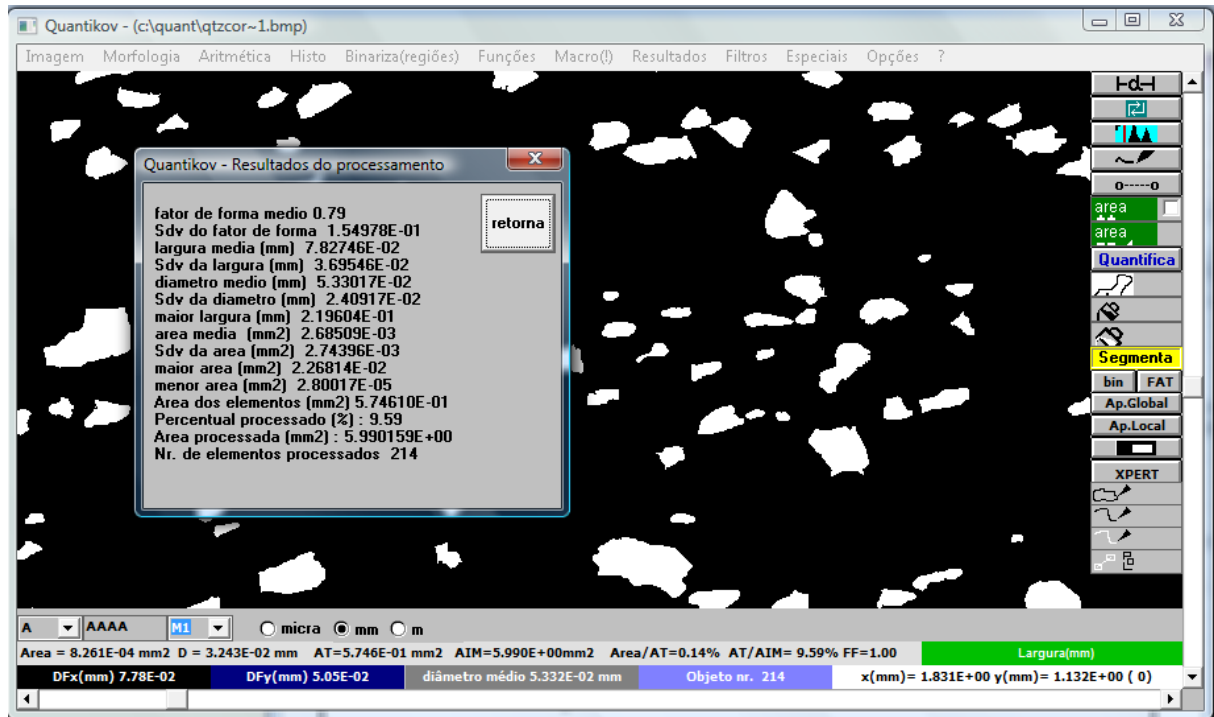


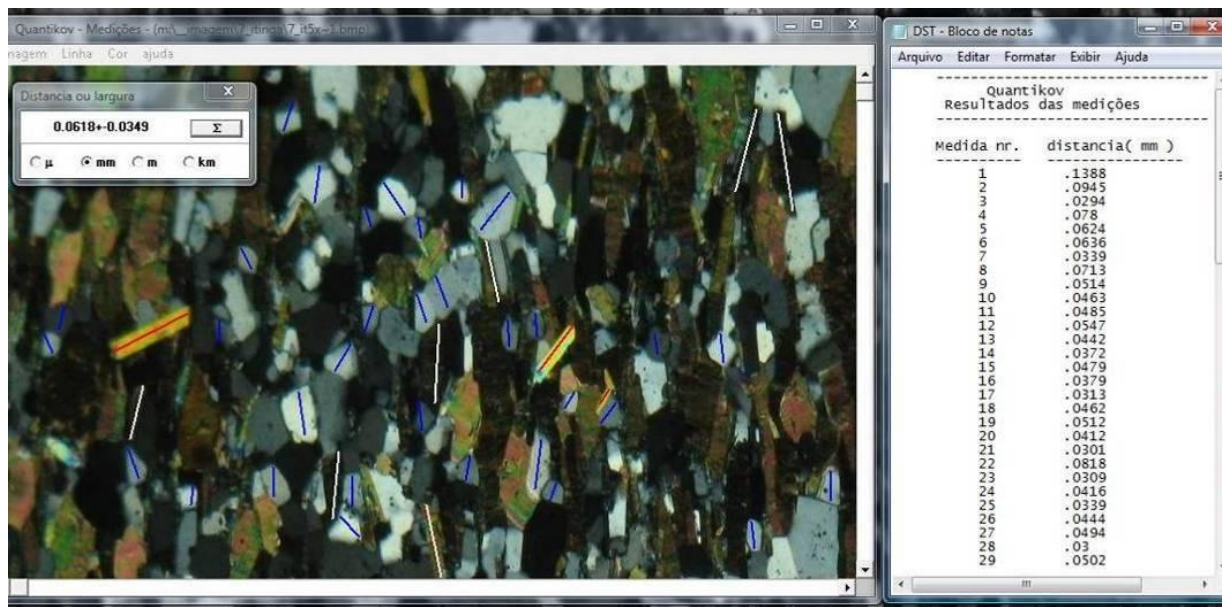
Figura 3.31 - Etapas de preparação de uma imagem para o cálculo de parâmetros geométricos: (a) imagem classificada em fases minerais; (b) imagem com cristais individualizados; (c) imagem binarizada, ainda com a presença de objetos muito pequenos e buracos; (d) imagem com pequenos objetos removidos; (e) imagem final com resultado do fechamento de buracos dentro de cada cristal; (f) mesma imagem com o parâmetro geométrico “orientação” exibido em vermelho (valor em graus).

Com o objetivo de verificar os resultados das propriedades medidas a partir de uma mesma imagem, foram quantificados os parâmetros geométricos no sistema Matlab® e no programa Quantikov, que consiste em um analisador microestrutural desenvolvido pelo Prof. Dr. Lúcio Carlos Martins Pinto, como parte de sua tese de doutorado (Pinto, 1996). Neste

sistema os tamanhos dos cristais foram medidos automaticamente a partir de uma imagem binária pré-processada no Matlab® (Figura 3.32.a) e de forma semiautomática com a realização de medidas de distância em segmentos criados manualmente sobre fotomicrografias (Figura 3.32.b). Não foram encontradas diferenças significativas de valores entre os sistemas.



(a)



(b)

Figura 3.32 - Telas do sistema Quantikov, com procedimentos para medições de parâmetros geométricos: (a) quantificação automática de parâmetros em uma imagem binária, a tela menor à esquerda exibe os resultados; (b) módulo que permite a realização de medidas de distância em segmentos criados manualmente, representados por traços azuis e vermelhos na tela. Os resultados das medições aparecem na lista à direita da tela.

3.2.1.3 Contato entre grãos

Em rochas metamórficas a forma e o tamanho dos grãos refletem a história dos minerais. Os contatos desenvolvem-se em função das características de composição, estrutura cristalina e orientação de cada grão individual e de sua relação com os cristais adjacentes. Importante observar que os contatos entre cristais de mesma composição diferem daqueles entre fases minerais distintas (Spry, 1986).

Para a avaliação das relações de contato entre grãos minerais, foi adotada uma classificação segundo a sua forma. Além dos tipos **plano**, **curvo** (ou côncavo-convexo) e **serrilhado**, utilizados por autores que desenvolveram estudos sobre rochas ornamentais (Meyer, 2003; Navarro, 2006), foi incluído o tipo **interlobado**, que consta na proposta elaborada por Spry (1986). As descrições dos tipos de contato foram feitas qualitativamente, com exame em microscópio petrográfico. A Figura 3.33 apresenta as formas básicas de contato entre grãos utilizadas na descrição petrográfica e a Figura 3.34 uma fotomicrografia em nicóis cruzados, para ilustrar exemplos dos tipos de contato entre grãos.

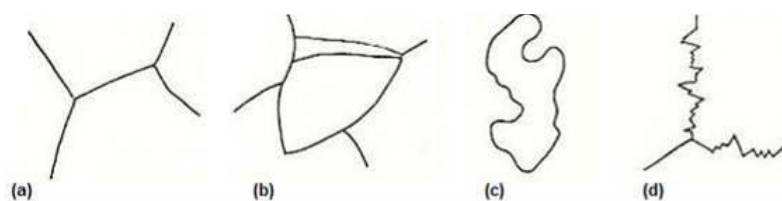


Figura 3.33 - Tipos de contatos entre grãos: (a) contato reto; (b) contato curvo; (c) contato interlobado; (d) contato serrilhado (Spry, 1986).

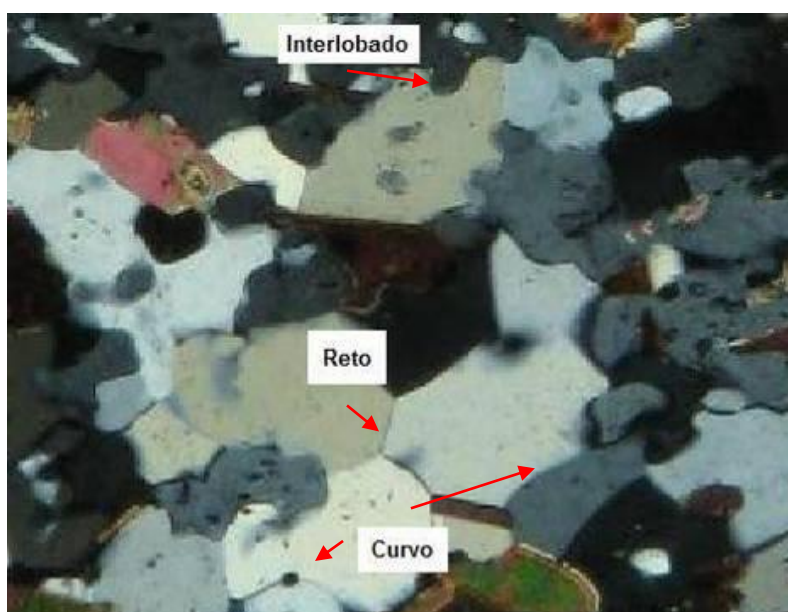


Figura 3.34 - Fotomicrografia com exemplos de contatos entre cristais.

3.2.1.4 Grau de coerência

Como complemento à descrição petrográfica macroscópica, foi efetuada uma classificação preliminar das rochas, quanto aos seus respectivos graus de coerência (Quadro 3.3), a partir da proposta elaborada por Frazão & Augusto Junior (1994). Da proposta original, consta a realização de um teste de resistência ao risco por lâmina de aço, que foi desconsiderado para o presente estudo, porque as rochas avaliadas têm de 35 a 55% de filossilicatos e algumas têm carbonatos, todos minerais com dureza abaixo de 5.

Grau de Coerência	Coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo e produz poucos fragmentos e de bordas cortantes.
	Medianamente coerente	Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo e produz fragmentos com bordas quebradiças por pressão dos dedos.
	Pouco coerente	Quebra com muita facilidade ao golpe de martelo (esfarela) e produz fragmentos que podem ser partidos manualmente.
	Incoerente	Quebra facilmente com a pressão dos dedos e se desagrega.

Quadro 3.3: Proposta de classificação preliminar para grau de coerência, adaptada de Frazão & Augusto Junior (1994).

3.2.2 Análise química e de identificação de minerais

3.2.2.1 Análise química de rocha total

Todos os litotipos que compõem este estudo foram analisados segundo os mesmos métodos analíticos. A preparação física constou de etapas de secagem, britagem a 2 mm, homogeneização, quarteamento, pulverização de 250 g a 300 g de amostra em moinho de aço a 95% -150 mesh. Os elementos maiores foram analisados por fluorescência de raios X em pastilhas preparadas por fusão com tetraborato de lítio. A determinação de Óxido Ferroso – FeO – foi realizada por titulometria. Os elementos menores foram analisados por ICP digestão multiácida. A perda por calcinação foi realizada com calcinação da amostra a 1000°C. Apenas para o folhelho foram analisados carbono e enxofre por combustão/detecção por infravermelho – IV (Leco). A preparação física e as análises químicas de rocha total foram realizadas pela empresa SGS Geosol Laboratórios.

3.2.2.2 Identificação de fases minerais por difração de raios X

Com o objetivo de confirmar fases minerais específicas, presentes em rochas utilizadas em monumentos históricos, realizaram-se análises de difração de raios X, no Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa-CPMTC, do Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Foram entregues amostras in natura, que foram então pulverizadas

para leitura por método do pó.

A difração foi realizada em equipamento PanAnalytical Xpert-Pro, com tubo de raios X de cobre. As condições de operação do difratômetro foram as seguintes: constante de tempo igual a 0,6s; posição inicial de 5,01° e posição final de 79,99° e incrementos angulares de 0,02°, varredura do tipo contínua. A medição foi realizada à temperatura de 25°C, intensidade de corrente de 45 mA e tensão de 40 kV.

3.2.3 Análises para caracterização tecnológica

Com o objetivo de caracterizar as rochas foliadas segundo suas propriedades tecnológicas, os litotipos selecionados foram submetidos a ensaios para a determinação das propriedades físicas e mecânicas, obedecendo aos procedimentos normativos definidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas- ABNT. No laboratório de rochas ornamentais – LABTEC Rochas do Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa-CPMTC, Instituto de Geociências da UFMG, foram realizados ensaios de índices físicos, desgaste abrasivo Amsler, ensaio de dilatação térmica linear e resistência à flexão.

Os resultados dos ensaios mecânicos foram avaliados juntamente com aspectos petrográficos, mineralógicos, texturais e estruturais dessas rochas, para um melhor entendimento sobre as relações entre as características intrínsecas das rochas e suas respostas frente aos diversos esforços.

3.2.3.1 Índices físicos

São designados índices físicos as propriedades de densidade aparente, porosidade aparente e absorção d'água. Para a determinação dos índices físicos foram seguidos os procedimentos descritos na norma NBR 15845 Anexo B (ABNT, 2010).

A norma define a seleção de 10 corpos-de-prova com dimensões aproximadas entre 5 e 7 cm e relação base: altura 1:1. Os corpos-de-prova são colocados em estufa a 70°C, em um intervalo de 24± 2 h, até que a massa constante seja atingida. Após a secagem, os corpos-de-prova são resfriados no dessecador e então são pesados em balança analítica, para obtenção do peso da massa seca. São então imersos em água, com preenchimento inicial de 1/3 da altura, após 4 horas é adicionada água até a marca de 2/3 da altura e, após 8 horas do início do ensaio, o nível de água é completado até sua submersão total. Os corpos-de-prova são deixados imersos em água por um tempo total de 40 h e, após este prazo, são pesados submersos em água e na sequência, são pesados diretamente na balança analítica para obtenção do peso da massa saturada.

Os valores dos índices físicos são calculados de acordo com as seguintes fórmulas:

Densidade aparente	$\rho_a = m_{seca} / (m_{saturada} - m_{submersa}) \times 1000$
Porosidade aparente	$\eta_a = (m_{saturada} - m_{seca}) / (m_{saturada} - m_{submersa}) \times 100$
Absorção de água	$\alpha = (m_{saturada} - m_{seca}) / (m_{seca}) \times 100$

A densidade aparente é expressa em kg/m³ e a porosidade e a absorção de água são expressas em valores percentuais.

3.2.3.2 Avaliação do desgaste por abrasão

A resistência ao desgaste por abrasão é a propriedade que a rocha possui de resistir à remoção por abrasão dos constituintes de sua superfície. Ela está associada à dureza de seus constituintes minerais e ao grau de coesão de seus componentes. O grau de coesão, por sua vez, está associado ao tamanho e contato entre grãos e ao grau de alteração.

Para avaliar a resistência das rochas estudadas quanto à abrasão, foram realizados ensaios segundo a norma NBR 12042 (ABNT, 1992), que trata da determinação do desgaste por abrasão para materiais inorgânicos. O desgaste *Amsler* simula a abrasão que ocorre em pisos revestidos com rochas ornamentais. O ensaio é realizado numa máquina denominada *Amsler*, a qual contém uma pista circular de aço, cujo percurso abrasivo é de 2 m, ou seja, a cada volta é percorrido 2 m. Nessa pista são colocados dois corpos-de-prova, que são submetidos ao desgaste com areia quartzosa e sob os quais é aplicada uma carga de aproximadamente 66 N. O aparelho usado no procedimento consta de uma pista de desgaste na forma de um anel de ferro fundido, com diâmetro externo de 800 ± 5 mm e largura de 160 ± 2 mm (Figura 3.35). O material da pista de desgaste tem a superfície plana e lisa e dureza *Brinell* entre 160 e 190.

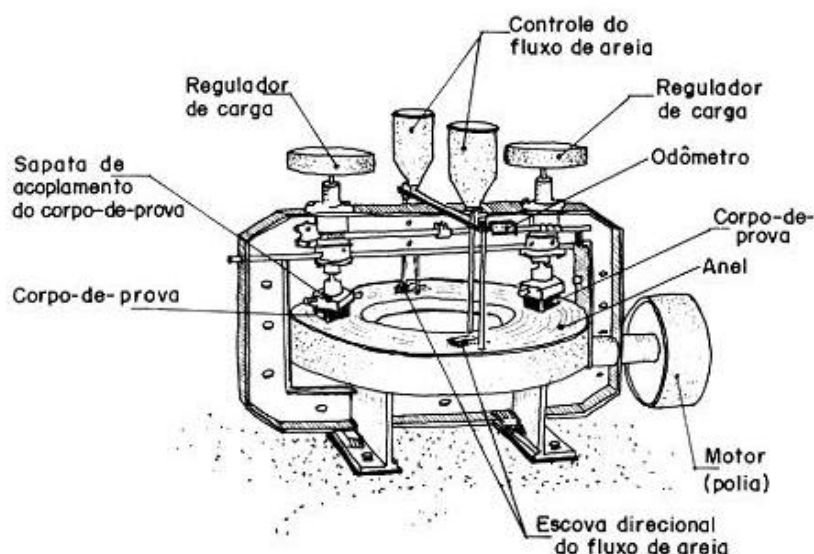


Figura 3.35 - Esquema do equipamento para ensaio de determinação do desgaste por abrasão, segundo norma NBR 12042 (ABNT, 1992).

3.2.3.3 Dilatação térmica linear

A dilatação térmica é uma propriedade que avalia a variação de tamanho de um determinado material frente a uma variação de temperatura. Trata-se de uma propriedade vetorial, influenciada pela composição mineralógica da rocha e por sua textura, englobando aspectos de forma e arranjo dos minerais e porosidade (Frazão, 2002).

Para realizar os ensaios de dilatação térmica linear foram seguidos os procedimentos definidos na norma NBR 15845 Anexo C (ABNT, 2010). Pela norma, os corpos-de-prova devem ter dimensões de 30 ± 2 mm na base e pelo menos o dobro desta medida na altura. Os corpos-de-prova devem ser saturados em água destilada ou deionizada. Então medir o comprimento inicial. Na sequência, no equipamento apropriado, proceder ao aquecimento e ao resfriamento, até a estabilização da temperatura, em cada fase.

Os valores do coeficiente de dilatação térmica linear são calculados através da seguinte expressão:

$$\beta_1 = \Delta L_1 / L_0 \times \Delta T_1$$

$$\beta_2 = \Delta L_2 / L_0 \times \Delta T_2$$

Onde:

β_1 é o coeficiente de dilatação térmica linear no resfriamento (mm/m °C);

β_2 é o coeficiente de dilatação térmica linear no aquecimento (mm/m °C);

ΔL_1 é o diferencial de comprimento do corpo de prova no resfriamento (mm);

ΔL_2 é o diferencial de comprimento do corpo de prova no aquecimento (mm);

L_0 é o comprimento inicial do corpo de prova (m);

ΔT_1 é o diferencial de temperatura no resfriamento (°C);

ΔT_2 é o diferencial de temperatura no aquecimento (°C).

3.2.3.4 Resistência à compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial visa quantificar a tensão de ruptura de um corpo de prova, quando submetido a esforço compressivo uniaxial. Os ensaios registram o valor máximo de tensão que a rocha suporta imediatamente antes da ruptura e são, portanto, uma indicação da resistência do material ao esforço mecânico compressivo.

Para rochas passíveis de serem utilizadas em funções estruturais, tais como pilastras e bases de edificações, é essencial o conhecimento da resistência da rocha à compressão.

. Conforme definido pela norma NBR 15845 Anexo E (ABNT, 2010), o ensaio é

executado em um mínimo de cinco corpos-de-prova cúbicos com arestas de aproximadamente 7,0 cm. Com uma prensa hidráulica com capacidade mínima de 1000 kN e resolução de 2 kN, é aplicada uma força com taxa de carregamento menor que 0,7 MPa/s, até que ocorra a ruptura. No caso de rochas foliadas, no mínimo dez corpos-de-prova são submetidos a esforços compressivos, sendo cinco com linha de carregamento com direção paralela à foliação e cinco com direção de carga perpendicular à foliação.

A tensão de ruptura é calculada pela seguinte expressão:

$$\sigma_c = P/A$$

Onde:

σ_c é a tensão de ruptura, expressa em megapascals (MPa);

P é a força máxima de ruptura, expressa em quilonewtons (kN);

A é a área da face do corpo de prova submetida ao carregamento, em metros quadrados. (m²).

Para o presente trabalho todas as amostras foram testadas no estado seco, com um mínimo de cinco corpos-de-prova com força aplicada paralela à estrutura e cinco corpos-de-prova com força aplicada ortogonal.

3.2.3.5 Resistência à flexão por carregamento em três pontos

A resistência à flexão é a propriedade que a rocha possui de resistir mediante um esforço fletor. Ela está associada à dureza de seus constituintes minerais e ao grau de coesão de seus componentes, que por sua vez está associado ao tamanho dos grãos e ao grau de alteração.

Para avaliar a resistência das rochas estudadas quanto à flexão foram realizados ensaios segundo a norma NBR 15845 Anexo F (ABNT, 2010), que visa determinar a tensão que provoca a ruptura da rocha quando submetida a esforços fletores. Neste ensaio é utilizada uma prensa hidráulica, com capacidade mínima de 100 kN e resolução igual ou inferior a 0,1 kN, que aplica de modo lento e progressivo uma carga sobre o corpo de prova, a uma taxa de 4450 N/min, até que ocorra a ruptura. Para a execução desse ensaio, os corpos-de-prova são apoiados em dispositivo apropriado, que possui dois cutelos inferiores e um superior, posicionado no meio da peça, em seu sentido longitudinal (Figura 3.36).

No caso de rochas foliadas, no mínimo dez corpos-de-prova são submetidos a esforços, sendo cinco com linha de carregamento com direção paralela à foliação e cinco com direção de carga perpendicular à foliação. No presente trabalho todas as amostras foram testadas no estado seco.

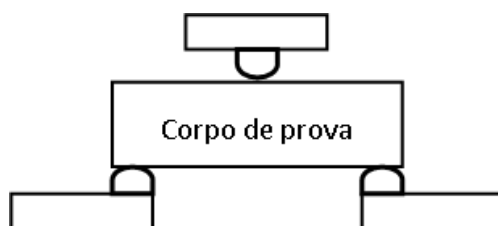


Figura 3.36 - Esquema de disposição do corpo de prova para o ensaio de resistência à flexão, conforme apresentado na norma NBR 15845 Anexo F (ABNT,2010).

O cálculo da tensão de ruptura é feito através da seguinte expressão:

$$R = 3PL/2bd^2$$

Onde:

R é a tensão de ruptura na flexão, expressa em megapascals (MPa);

P é a força de ruptura expressa em quilonewtons (kN)

L é a distância entre os cutelos de ação (cm ou m)

B é a largura do corpo de prova (cm ou m)

D é a espessura do corpo-de-prova (cm ou m)

3.2.3.6 Determinação da anisotropia

Para avaliar a influência da estrutura da rocha sobre propriedades geomecânicas, que recebem esforços segundo direções distintas, foram calculados os valores de anisotropia para os resultados dos ensaios de resistência à abrasão, dilatação térmica linear, resistência à compressão uniaxial e resistência à flexão, já diversos autores apontam uma a influência da textura.

Diferentemente de estudos anteriores, que empregaram o critério de valor máximo menos o valor mínimo, dividido pelo valor máximo (Navarro, 2006), os cálculos foram realizados com base na direção do esforço em relação ao plano da foliação. Essa modificação foi feita uma vez que o material de estudo são rochas foliadas, e um dos objetivos da tese consiste em avaliar a influência do metamorfismo, que se reflete na textura das rochas, sobre as propriedades geomecânicas. Assim, foi necessário manter sempre o mesmo plano de referência, independentemente se ele corresponde à direção de valor máximo para o ensaio ou não.

Para os ensaios de resistência à abrasão, a anisotropia foi determinada pela expressão:

$$A = (h_1 - h_2)/h_1 \times 100$$

Onde:

A = anisotropia;

h_1 = desgaste para face exposta do corpo de prova paralela à foliação (mm);

h_2 = desgaste para face exposta do corpo de prova perpendicular à foliação (mm);

Para os ensaios de dilatação térmica linear, a anisotropia foi determinada pela expressão:

$$A = (\beta_1 - \beta_2) / \beta_1 \times 100$$

Onde:

A = anisotropia;

β_1 = coeficiente de dilatação térmica linear para eixo do corpo de prova paralelo à foliação (mm/m °C);

β_2 = coeficiente de dilatação térmica linear para eixo do corpo de prova perpendicular à foliação (mm/m °C);

Para os ensaios de resistência à compressão uniaxial e de resistência à flexão, a anisotropia foi determinada pela expressão:

$$A = (\sigma_1 - \sigma_2) / \sigma_1 \times 100$$

Onde:

A = anisotropia;

σ_1 = valor de tensão para direção de carga aplicada perpendicular à foliação (MPa);

σ_2 = valor de tensão para direção de carga aplicada paralela à foliação (MPa).

4. RESULTADOS DAS ANÁLISES

Para a obtenção de informações que permitissem conhecer as propriedades das rochas foliadas, suas inter-relações e influências sobre seu comportamento, foram realizados ensaios de caracterização petrográfica, caracterização geoquímica e caracterização tecnológica. Os resultados destes ensaios são apresentados a seguir.

As rochas foliadas foram agrupadas em conjuntos com origens e características químicas distintas. Do grupo dos metapelitos, foram avaliados: folhelho denominado comercialmente ardósia cinza, do Grupo Bambuí, cujas amostras foram coletadas na região de Paraopeba; granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto e granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto do Grupo Sabará, com amostras coletados respectivamente em Sabará e Passagem de Mariana, no Quadrilátero Ferrífero; xistos do Grupo Macaúbas, representados por um estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto e um cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, com amostras coletadas próximo às cidades de Araçuaí e Itinga, no Médio Vale do Jequitinhonha. Xisto verde, representado por um albita-carbonato-clorita-quartzo xisto amostrado entre as cidades de Caeté e Sabará e xisto ultramáfico, representado por cromita-clorita-carbonato-talco xisto da Sequência Serro amostrado próximo à cidade de Serro, na Serra do Espinhaço Meridional, completaram o conjunto de rochas xistosas analisadas.

4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE PETROGRÁFICA

Na caracterização petrográfica foram considerados: composição mineralógica, envolvendo minerais primários e secundários, bem como aspectos texturais. Em termos texturais, foram avaliados: o tamanho dos grãos, a disposição dos minerais na rocha e as formas de contatos entre os mesmos.

A partir da análise de imagens obtidas com o uso de equipamento acoplado ao microscópio óptico, foram levantadas as frequências para os tamanhos de grãos identificados, que são apresentadas por tipo de rocha e em seguida às descrições petrográficas. Para cada litotipo, foram descritas três lâminas delgadas, sendo que para cada uma delas, foi analisado um conjunto de imagens, que englobou toda a área da lâmina. Especificamente para o folhelho, para a descrição petrográfica foram utilizadas, além das lâminas, seções polidas com imagens capturadas no Microscópio Eletrônico de Varredura.

4.1.1 Folhelho, Paraopeba-MG

O folhelho, denominado comercialmente como ardósia cinza e coletado próximo à cidade de Paraopeba-MG, é uma rocha com granulação extremamente fina, onde macroscopicamente somente diminutos e raros cristais de opacos são possíveis de individualizar (Figura 4.1). Apresenta coloração cinza quando seca, e cinza escura quando molhada e um bandamento milimétrico discreto, identificado por tons de cinza. Microscopicamente observa-se uma textura granolepidoblástica e uma estratificação muito fina e bem definida, com níveis escuros mais finos e com maior percentual de filossilicatos. Os principais minerais que compõem a rocha são quartzo, clorita, moscovita, carbonato, apatita e raros grãos de apatita e minerais opacos.

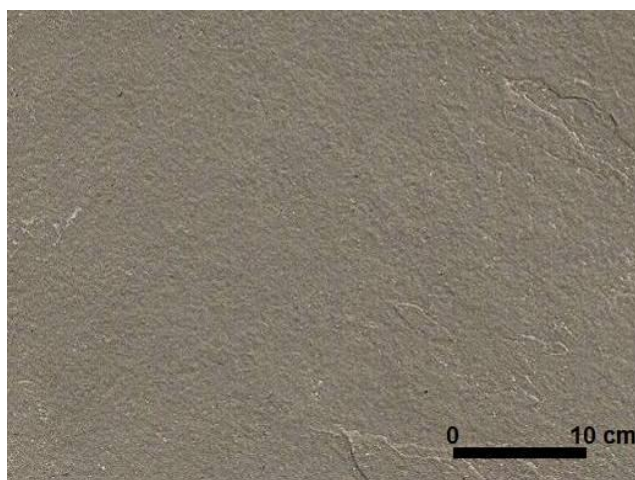


Figura 4.1 - Folhelho: aspecto macroscópico. Rocha denominada comercialmente como ardósia cinza.

O **quartzo** ocorre na forma de grãos diminutos.

O **carbonato** ocorre disperso na rocha e também concentrado em filmes descontínuos, onde os cristais são maiores (da ordem de 10 a 30 μm).

A **mica branca** ocorre predominantemente na forma de sericita. Mais raramente são observadas palhetas de moscovita mais desenvolvidas, com tamanho de cristais entre 10 μm e 50 μm (Figura 4.4).

A **clorita** ocorre na forma de finas palhetas associadas com moscovita. Em raras palhetas maiores é possível observar, sob nicóis descruzados, uma coloração verde claro e leve pleocroísmo (Figura 4.4.g). Foram realizadas leituras pontuais de EDS no microscópio eletrônico de varredura, que confirmaram a presença predominante de quartzo, clorita e moscovita (Figura 4.2.a).

A **apatita** foi observada na forma de pequenos cristais de relevo alto e contornos arredondados, dispersos na rocha. Sua identificação foi confirmada em leitura de EDS no microscópio eletrônico de varredura (Figura 4.2.a).

Os **opacos** ocorrem como grãos diminutos. No MEV-EDS foi identificado um sulfeto de ferro e cobre – calcopirita (Figura 4.2.b).

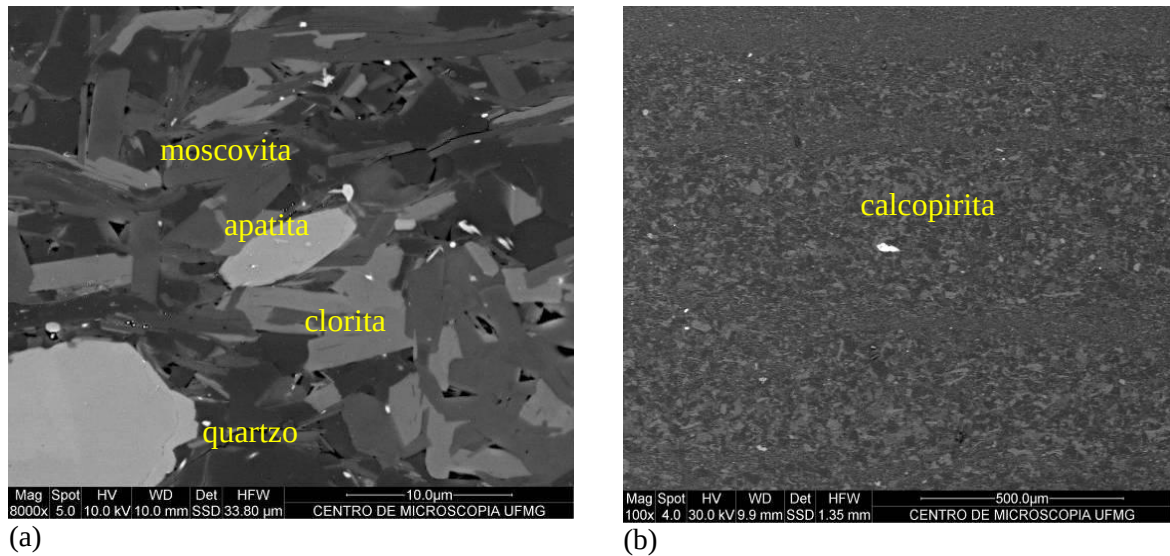


Figura 4.2 - Folhelho: imagens de seções polidas, capturadas por MEV-BSE, no Centro de Microscopia da UFMG: (a) palhetas de clorita e moscovita e grãos de quartzo e, no centro da imagem, um cristal de apatita com tamanho de 8 µm, magnificação 8000x; (b) bandamento e um cristal de calcopirita (CuFeS), magnificação 100x.

O folhelho avaliado encontra-se na zona de transição entre processos diagenéticos e metamorfismo incipiente. Segundo Yardley (1989), para rochas pelíticas não há um limite exato que defina entre diagênese e metamorfismo de baixo grau. Clorita, moscovita e apatita, identificadas nessa rocha, podem ocorrer como minerais detríticos em rochas sedimentares ou se formarem tanto por processos diagenéticos, como por metamorfismo de baixo a médio grau (Deer *et al.*, 1992). Os exames de seções polidas identificaram uma disposição planar preferencial nos filossilicatos (Figura 4.3), sem a definição de lineação mineral.

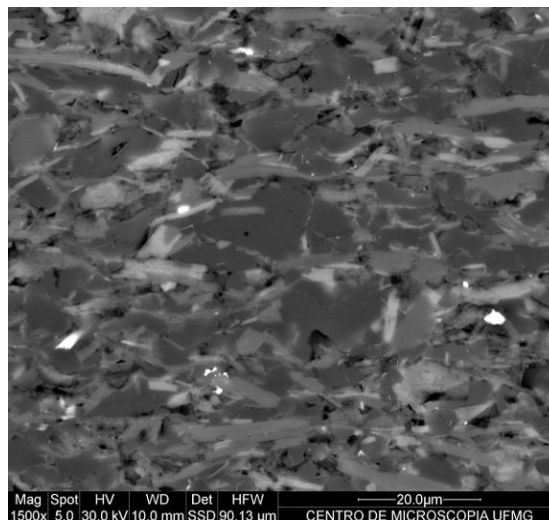


Figura 4.3 - Folhelho: imagem de seção polida, capturada por MEV-BSE, no Centro de Microscopia da UFMG: disposição preferencial de clorita e moscovita, magnificação de 1500x. Seção polida cortada perpendicularmente à foliação.

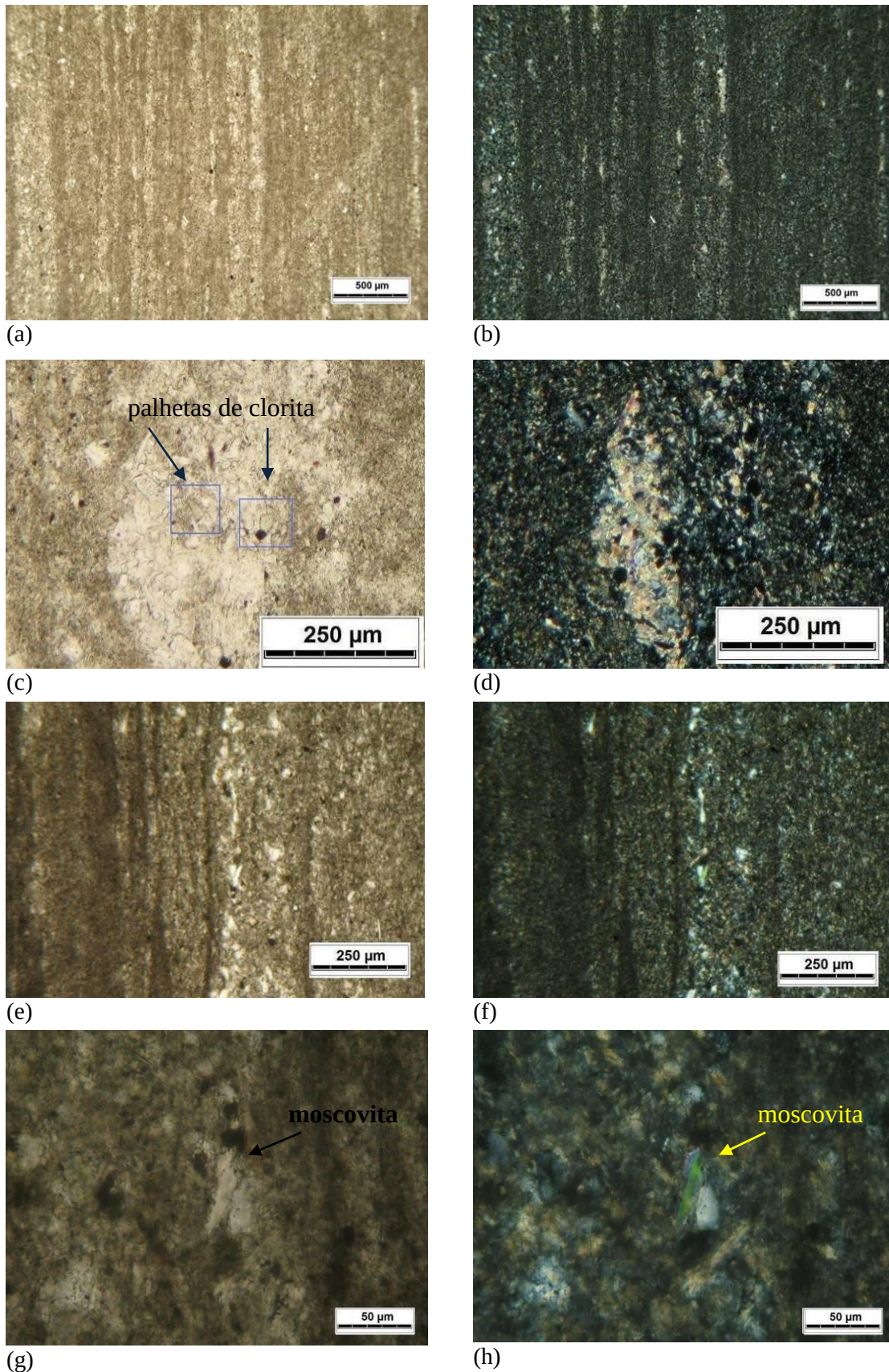


Figura 4.4 - Fotomicrografias de folhelho, coletado próximo a Paraopeba-MG: aspecto geral da rocha, com bandamento composicional e granulométrico (a) nicóis descruzados e (b) cruzados; palhetas de clorita, nicóis (c) descruzados e (d) cruzados; bandas claras com cristais maiores de quartzo e moscovita, nicóis (e) descruzados e (f) nicóis cruzados; palheta de moscovita, nicóis (g) descruzados e (h) cruzados.

Parâmetros geométricos dos cristais

Considerando todos os minerais que compõem o folhelho, examinados em lâminas delgadas, os tamanhos dos grãos variam entre 1 e 30 μm , sendo observada uma variação entre as bandas e mesmo dentro de uma banda. Os cristais de quartzo têm tamanho médio de 4 μm com variação entre 1 e 12 μm (Tabela 4.1). Com relação aos filossilicatos, ao microscópio petrográfico com objetiva de 50x foi possível medir apenas os cristais maiores, que ocorrem na forma de palhetas isoladas e que não refletem a granulação geral da rocha. Esses cristais alcançam tamanhos de 33 μm para as cloritas e 50 μm para as palhetas de mica. As medidas das palhetas menores, que são predominantes na rocha, foram feitas em imagens de elétrons retro-espalhados (BSE), lidas no microscópio eletrônico de varredura com magnificação de 1000x (Figura 4.4.a) e resultaram em valores médios de 4 μm para os cristais de clorita e de moscovita (Tabela 4.1 e Figura 4.7).

Tabela 4.1 - Folhelho: Dados estatísticos descritivos para tamanho e razão de alongamento dos principais minerais.

Fase Mineral	Média μm	Coef. Variação %	Mínimo μm	Máximo μm	Assimetria	Razão de alongamento
Quartzo	4	47	1	12	0,9	2,0
Clorita	4	69	1	33	3,3	3,9
Moscovita	4	54	1	50	1,5	4,3

A seguir, um sumário gráfico, na forma de um diagrama *boxplot*, mostra a distribuição do tamanho dos cristais das fases minerais: o traço horizontal no centro da caixa corresponde à mediana, os traços verticais indicam os valores até 1,5 vezes a tendência central e os asteriscos (*) representam extremos (Figura 4.5.b).

Quanto ao alongamento dos cristais, o gráfico de barras na Figura 4.5.c ilustra os percentuais de grãos alongados, sub-alongados e não alongados das principais fases minerais. Nos cristais de quartzo predominam os grãos sub-alongados ou não alongados, que correspondem a 63% do total.

O padrão de distribuição das orientações dos cristais, no plano da foliação, está representado no histograma polar na Figura 4.5.c. Por esse gráfico observa-se que, para o folhelho examinado, não há uma lineação mineral definida. No entanto, há uma direção preferencial de disposição planar dos minerais, conforme pode ser observado no histograma polar com a direção dos minerais, em seção polida cortada perpendicularmente à foliação.

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam histogramas individualizados por fases minerais (quartzo e filossilicatos clorita e moscovita, respectivamente), com padrões de distribuição dos tamanhos dos grãos e da razão de alongamento.

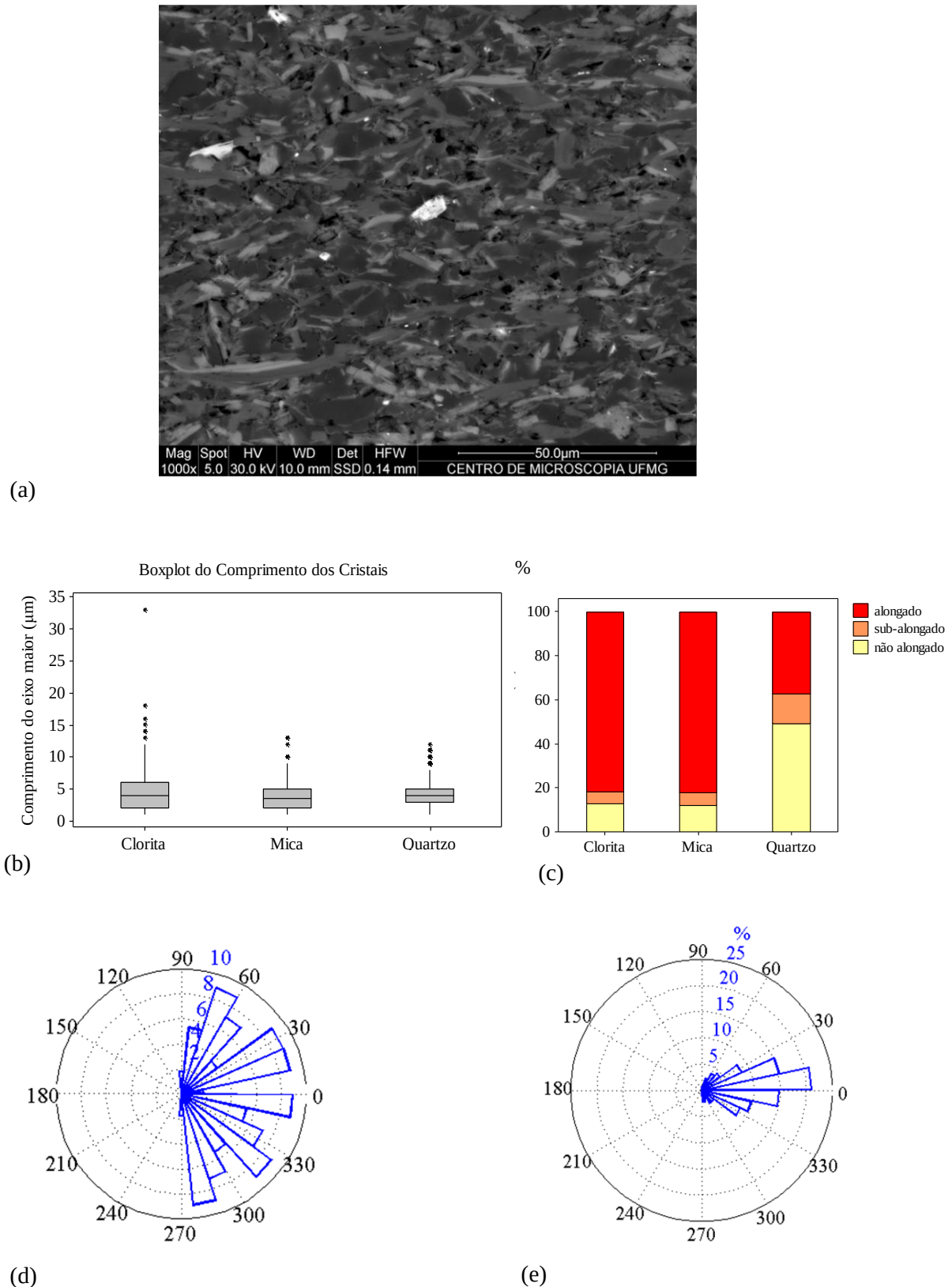
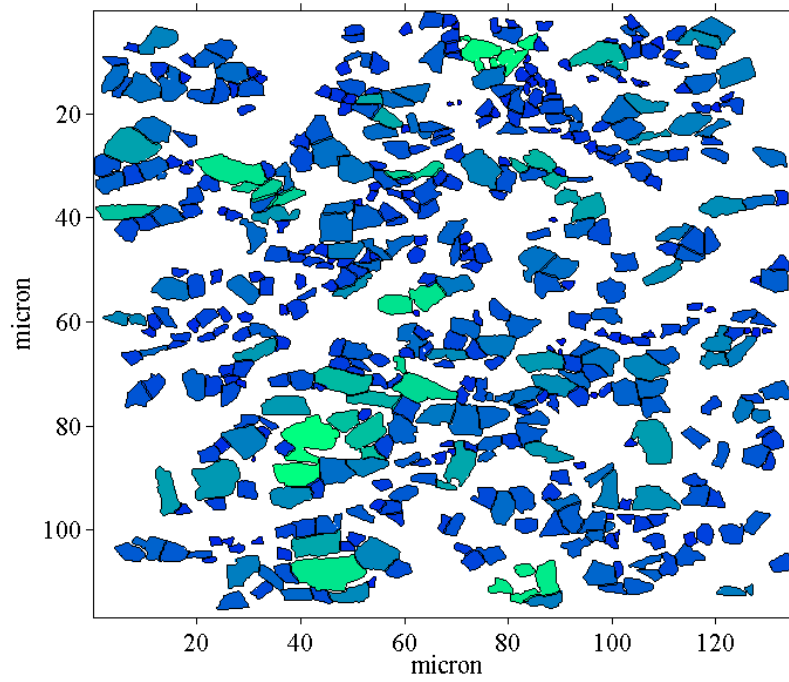
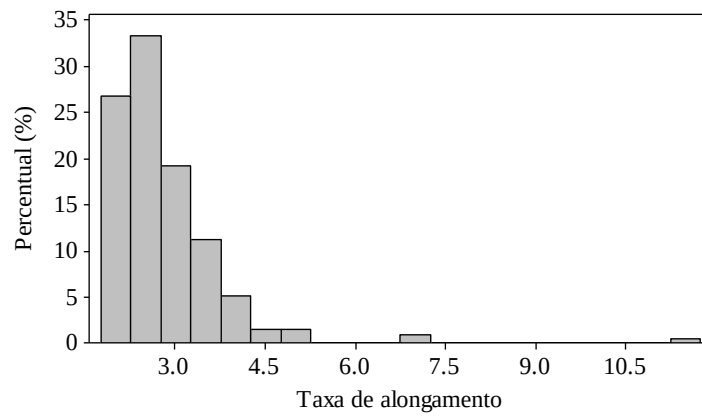


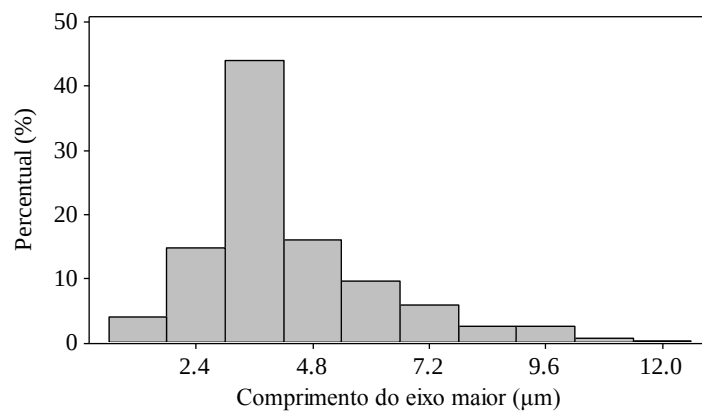
Figura 4.5 - Folhelho, coletado próximo a Paraopeba-MG: (a) aspecto geral da rocha, 1000x, imagem de BSE; (b) sumário gráfico onde a mediana está representada na faixa central da caixa e os valores anômalos representados por asteriscos (*); (c) gráfico de barras a 100% com os minerais classificados quanto ao alongamento; (d) diagrama polar com orientação dos minerais no plano de foliação e (e) diagrama polar com orientação dos minerais no plano perpendicular à foliação.



(a)

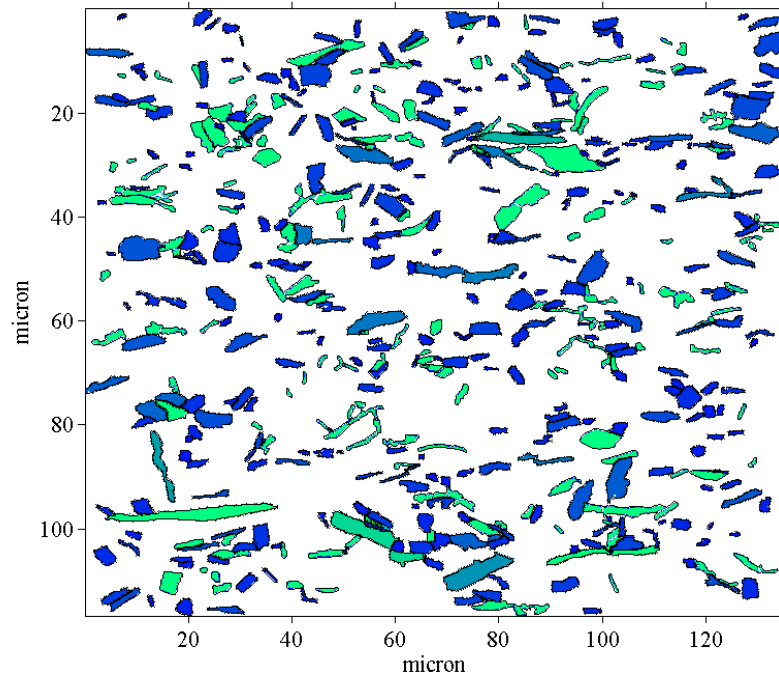


(b)

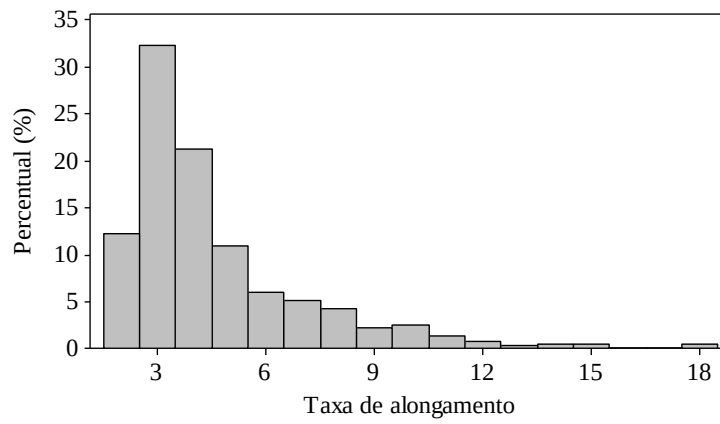


(c)

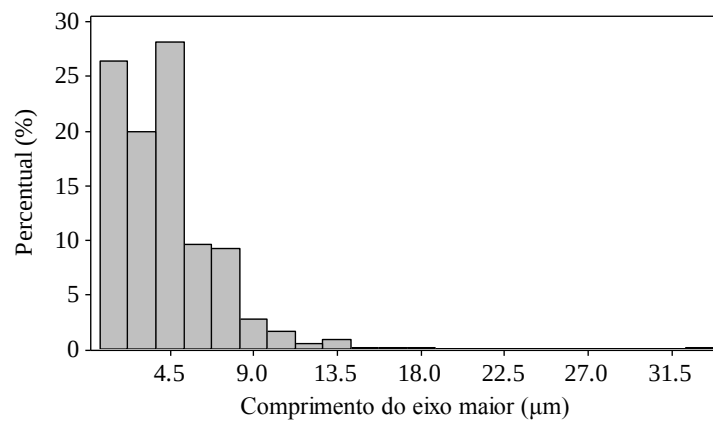
Figura 4.6 - Folhelho coletado próximo a Paraopeba-MG: imagem de cristais de quartzo individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.7 - Folhelho, coletado na região de Paraopeba-MG: imagem de cristais de clorita e moscovita individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).

4.1.2 Granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto, Sabará-MG

O granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto, que aflora próximo à cidade de Sabará, é uma rocha de granulação fina, com coloração cinza escuro quando seco e cinza muito escuro quando úmido. Apresenta textura granolepidoblástica e bandamento milimétrico, conferido pela variação do tamanho de grãos de quartzo e pelo percentual de filossilicatos presentes. A rocha apresenta baixa fissilidade e encontra-se pouco alterada (Figura 4.8).



Figura 4.8- Granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto: aspecto macroscópico, onde se observa a presença de bandas mais claras alternadas a bandas escuras. A amostra foi molhada para melhor visualização das estruturas.

A rocha é constituída predominantemente por quartzo (35-40%), moscovita (25-30%), clorita (15-20%), minerais opacos (2-3%) e blastos de estaurolita (2-5%) e granada (menor que 1%). Ao microscópio óptico observa-se uma alternância de níveis finos micáceos com níveis quartzosos (Figura 4.9.a-b).

O **quartzo** ocorre na forma de cristais não alongados a alongados. Os contatos intergrãos são predominantemente curvos e interlobados, o que confere um bom embricamento entre os grãos. Contatos planos entre os cristais estão presentes em menor quantidade. Há uma variação no tamanho dos grãos, sendo que os cristais maiores ocorrem na forma de agregados, contornados pela foliação (Figura 4.9.d) ou em sombras de pressão de minerais opacos.

A **moscovita** é o filossilicato predominante e ocorre na forma de palhetas orientadas. Há regiões onde se observam concentrações de cristais maiores de moscovitas não orientados (Figura 4.9.d).

A **clorita** ocorre na forma de palhetas finas, com forte pleocroísmo em tons de verde (Fe-Clorita) e, juntamente com a moscovita, define a foliação (Figura 4.9.a-b).

A **estauroлита** ocorre como blastos submilimétricos, com relevo alto e cor amarela característica. Foram observados cristais contornados pela foliação ou rotacionados (Figura 4.9.a-b).

A **granada** ocorre como cristais contornados pela foliação, com grande quantidade de inclusões (Figura 4.9.e-f), parcialmente rotacionados.

Os **minerais opacos** ocorrem como cristais contornados pela foliação e apresentam frequentemente sombra de pressão de clorita e quartzo.

Nesse xisto de composição peraluminosa, a paragênese mineral com quartzo, clorita, estauroлита e granada indica um metamorfismo do tipo barroviiano na zona da estauroлита, em temperaturas da fácies anfibolito inferior. Segundo Yardley (1989) quando a rocha contém estauroлита faz-se a distinção entre os pelitos verdadeiros para outros mica xistos, uma vez que a mesma desenvolve-se em rochas pelíticas aluminosas pobres em Ca e raramente em outras litologias. Estauroлита+quartzo são estáveis a $P > 1,5$ kbar e temperatura entre 500-700°C (Deer *et al.*, 1992) com limite inferior por volta de 510-530 °C de acordo com dados de Richardson (1968) e Rao & Johannes (1979), compilados por Yardley (1989). A presença do par granada+estauroлита sem biotita permite estimar uma pressão $P > 3,0$ kbar para o metamorfismo dessa rocha (Spear, 1995).

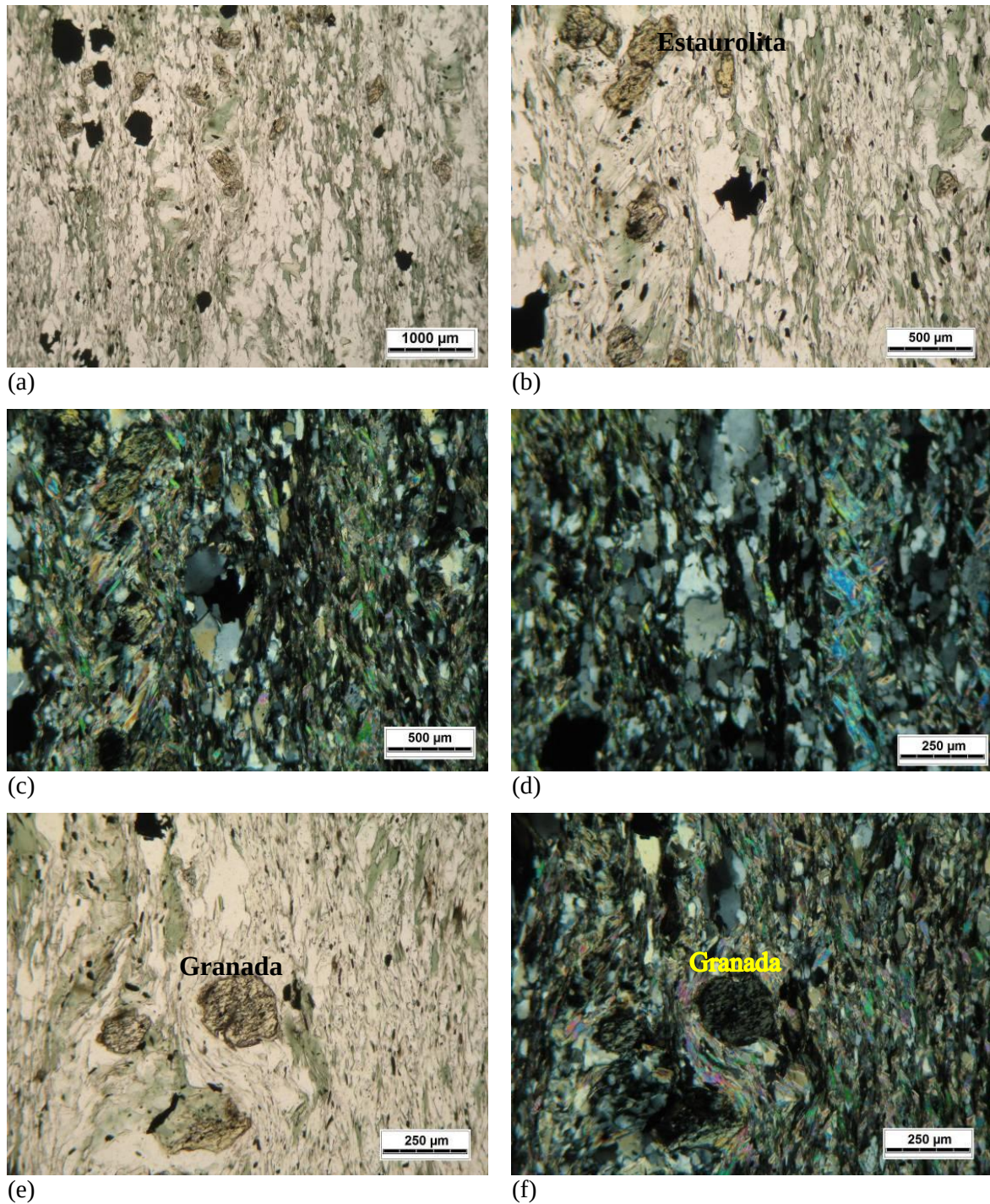


Figura 4.9 – Fotomicrografias de granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto, coletado próximo a Sabará-MG: (a) aspecto geral da rocha, nicóis descruzados; (b) cristais de estaurolita orientados segundo a foliação, nicóis descruzados; (c) disposição das palhetas de micas e cristais de quartzo, nicóis cruzados; (d) cristais maiores de quartzo com contatos curvos a interlobados e palhetas de moscovita, nicóis cruzados; (e) cristal de granada contornado pela foliação, nicóis descruzados e (f) nicóis cruzados.

Parâmetros geométricos dos cristais:

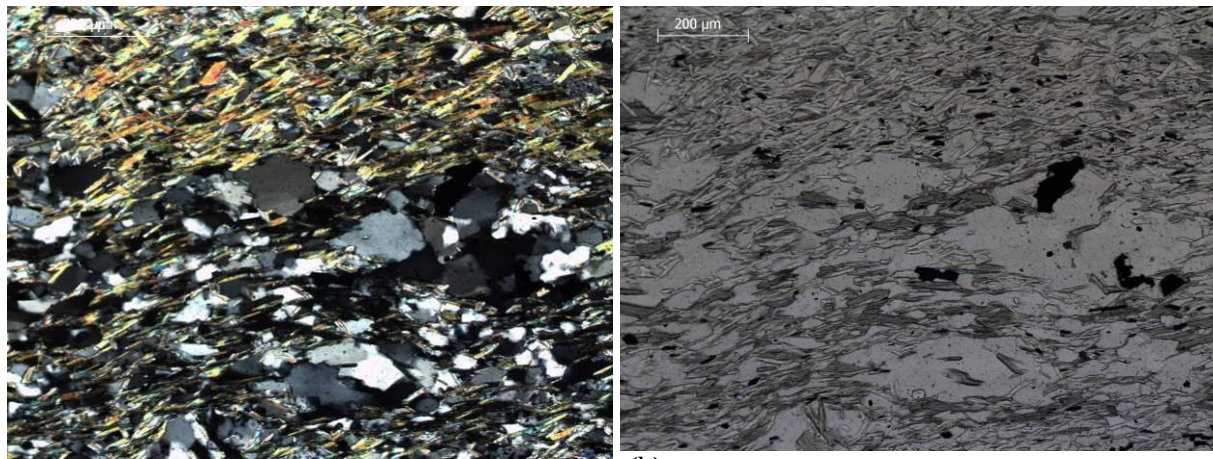
No granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto foi observada uma diferença entre os tamanhos de cristais de quartzo dispersos na rocha, com valor médio de 23 μm , para aqueles entrelaçados com os filossilicatos, e valor médio de 78 μm , para os cristais que estão nas sombras de pressão dos minerais opacos e em níveis mais quartzosos (Tabela 4.2). A distribuição do tamanho dos cristais de quartzo mostra uma forte assimetria para cristais menores, que são predominantes na rocha. Em termos gerais, os cristais menores são menos alongados que os maiores (Figura 4.11.b). O tamanho dos cristais dos filossilicatos apresentou um padrão de distribuição próximo ao normal (Figura 4.12).

Tabela 4.2 - Granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto: dados estatísticos descritivos para tamanho e razão de alongamento dos principais minerais.

Fase Mineral	Média μm	Coef. Variação %	Mínimo μm	Máximo μm	Assimetria	Razão de Alongamento
Quartzo fino	23	49	5	50	0,6	2,0
Quartzo em sombra de pressão e níveis quartzosos	78	37	50	180	1,6	2,7
Clorita e Moscovita	41	45	6	117	0,9	6,2
Estaurolita	400	27	170	600	-	-
Granada	200	-	100	300	-	-
Opaco	100	68	40	200	-	-

Nas páginas a seguir estão ilustrados os resultados dos cálculos dos parâmetros geométricos para os principais minerais constituintes da rocha. Um sumário gráfico mostra a distribuição do tamanho dos cristais das fases minerais: a linha central da caixa corresponde à mediana, os traços verticais indicam os valores até 1,5 vezes a tendência central e os asteriscos (*) representam extremos (Figura 4.10.c). Quanto ao alongamento dos cristais, o gráfico de barras na Figura 4.10.d ilustra os percentuais de grãos alongados, sub-alongados e não alongados das principais fases minerais. O padrão de distribuição das orientações dos cristais no plano de foliação está representado em um histograma polar, na Figura 4.10.e. Os cristais de quartzo e filossilicatos, que são os minerais predominantes na rocha, exibem uma orientação bem definida, com baixa dispersão. Os blastos de estaurolita, embora com uma variação de direção maior, também estão orientados e seguem a foliação principal.

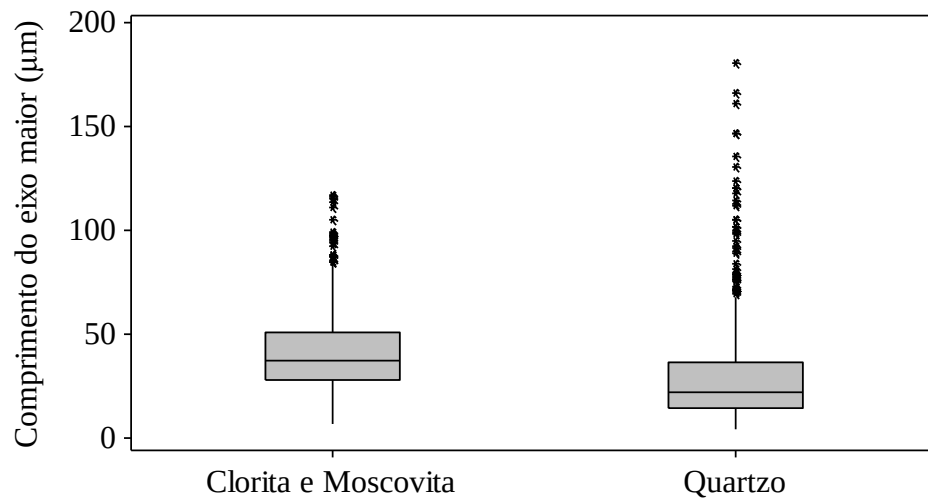
Na sequência, para cada fase mineral são apresentados o histograma com a distribuição dos tamanhos dos grãos e o histograma da razão de alongamento, calculada pela razão entre o comprimento do eixo maior pelo comprimento do eixo menor do cristal. (Figuras 4.11 e 4.12).



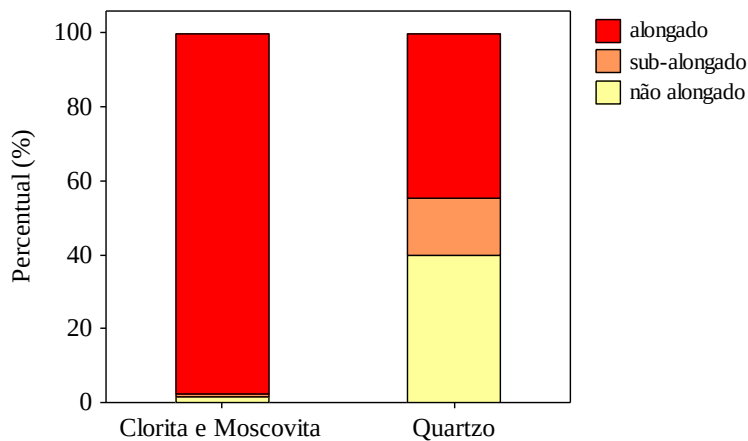
(a)

(b)

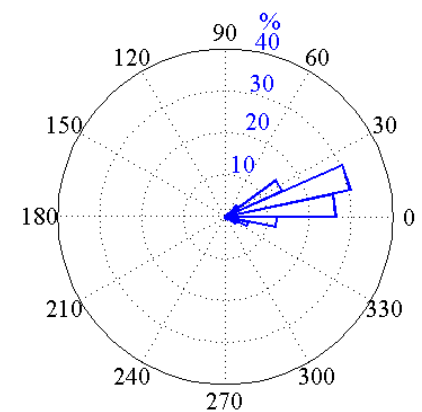
Boxplot do Comprimento dos Cristais



(c)

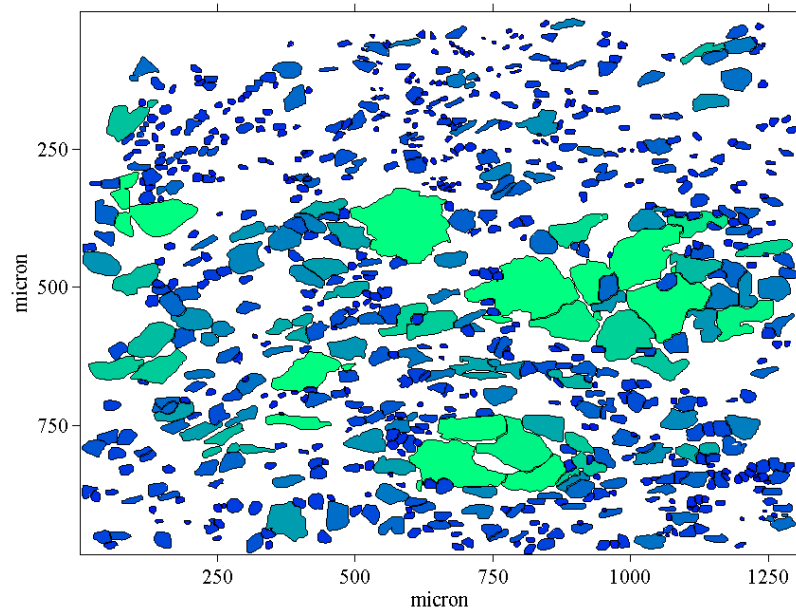


(d)

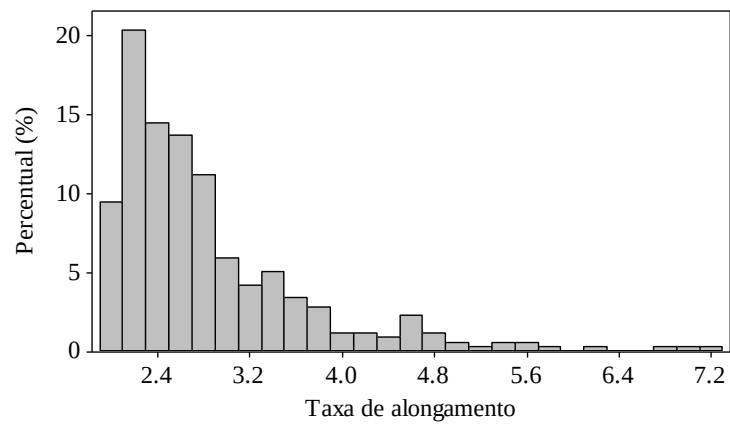


(e)

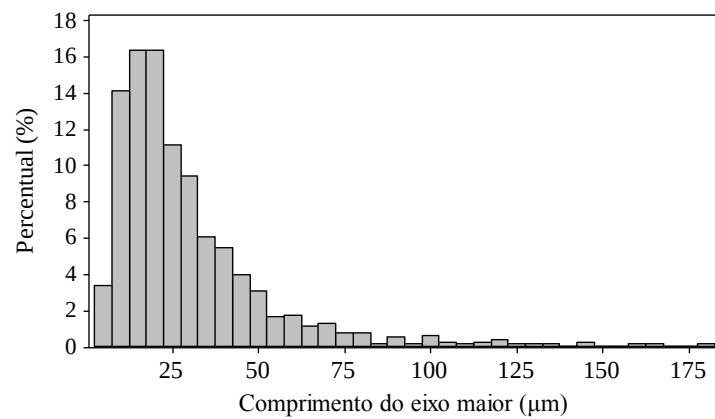
Figura 4.10 - Granada-estauroлита-clorita-moscovita-quartzo xisto, coletado próximo a Sabará-MG: (a) aspecto geral da rocha, 25x, nicóis cruzados e (b) nicóis descruzados; (c) sumário gráfico com a distribuição central e mediana na caixa e valores anômalos representados por asteriscos; (d) gráfico de barras a 100% com os minerais classificados quanto ao alongamento; (e) diagrama polar com orientação dos minerais no plano de foliação.



(a)

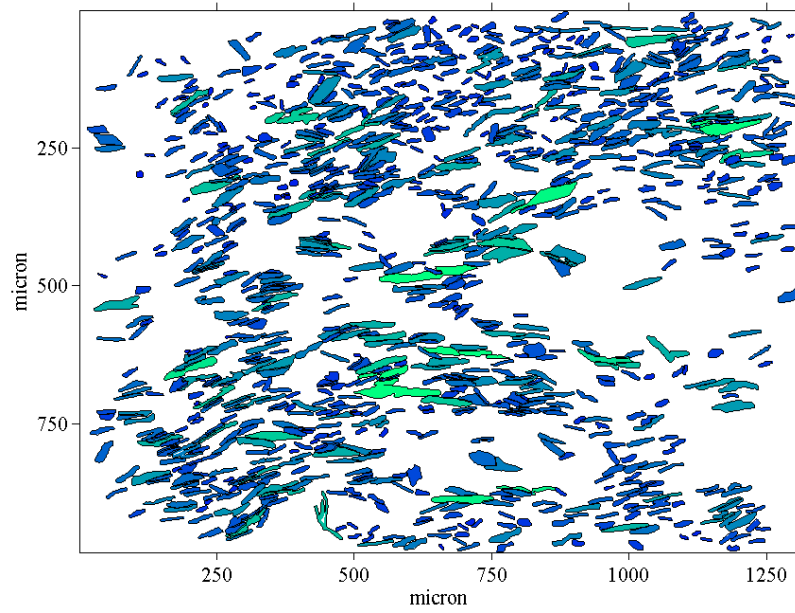


(b)

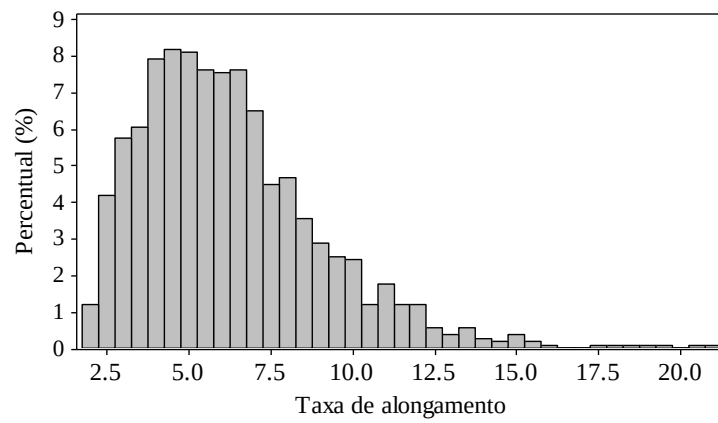


(c)

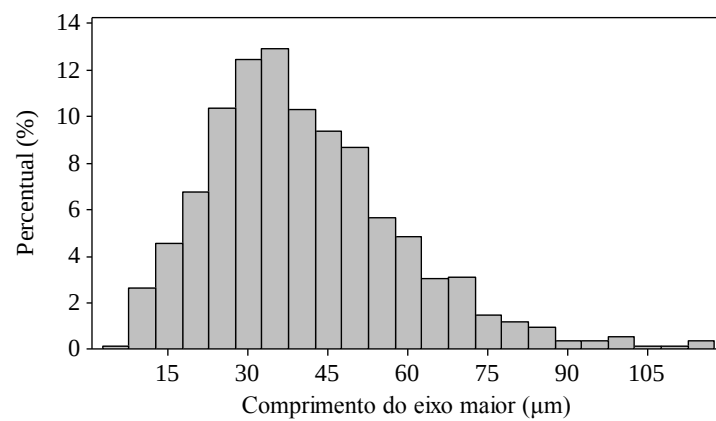
Figura 4.11 - Granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto: imagem de cristais de quartzo individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.12 - Granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto: imagem de cristais de filossilicatos (clorita e moscovita) individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).

4.1.3 Granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, Passagem de Mariana-MG

O granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, coletado próximo à localidade de Passagem de Mariana-MG, é uma rocha de granulação fina, com certa variação conferida pela presença ou não de fragmentos líticos. Apresenta textura granolepidoblástica com foliação bem desenvolvida. Trata-se de um xisto com coloração cinza claro a cinza azulado quando seco e cinza quando úmido, que apresenta, como feição característica, cristais de cianita visíveis macroscopicamente (Figura 4.13), dispostos concordantes com a xistosidade ou orientados segundo uma lineação de crenulação.



Figura 4.13 - Granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto: aspecto macroscópico. Fotografia capturada em afloramento próximo à localidade de Passagem de Mariana-MG, onde se observam cristais milimétricos de cianita, com coloração mais escura e relevo mais alto em relação ao restante da rocha.

A rocha é composta predominantemente por quartzo (30-40%), clorita (30-40%), moscovita (10-15%), cianita (2-5%), granada (1-2%), fragmentos líticos (3-7%) e opacos (1-3%). Foram identificados fragmentos de quartzito, filito e seixos subarredondados de quartzo. Os fragmentos encontram-se frequentemente crenulados juntamente com a foliação e têm tamanho da ordem de 0.5 mm a 15 mm.

Feições de microfissuramento foram observadas nos cristais de cianita e granada e a rocha apresenta uma alteração incipiente, sendo visível em algumas regiões filmes de óxidos ou hidróxidos. O grau de coerência deste material é menor em relação aos outros litotipos do conjunto, rompendo-se com facilidade ao golpe do martelo. Apresenta boa fissilidade em função do grau de alteração e da presença de segregação de níveis mais micáceos e níveis

quartzosos.

O **quartzo** ocorre na forma de cristais não alongados a alongados, com predomínio de contatos retos, por vezes poligonais, sendo observados contatos curvos subordinadamente. Foram observados também seixos arredondados de quartzo, que se destacam em relação à porção mais fina predominante da rocha.

A **clorita** ocorre na forma de palhetas orientadas, que marcam a foliação principal. Encontram-se distribuídas por toda rocha, sendo o filossilicato predominante. Apresenta coloração verde com marcante pleocroísmo (Fe-clorita) e localmente observa-se processo de alteração, indicado pela presença de filmes de óxidos-hidróxidos, em tons de coloração marrom.

A **moscovita** ocorre como palhetas finas, comumente associada à clorita. Foram observadas, em menor quantidade, palhetas com orientação discordante da preferencial.

A **cianita** ocorre na forma de cristais frequentemente esqueletiformes (Figuras 4.14.e-f). Há uma grande dispersão de tamanho de cristais de cianita. Em lâmina, foram observados cristais maiores, com tamanho médio de 200 μm , e outros menores, dispersos pela rocha, variando entre 30 μm e 400 μm . Macroscopicamente foram identificados cristais ainda maiores, com tamanhos entre 3 e 8 mm. Os cristais menores estão mais bem preservados.

Granada ocorre na forma de cristais subédricos a euédricos, com inclusões de quartzo e bordas corroídas. Os grãos apresentam-se contornados pela foliação, frequentemente com palhetas de moscovita e clorita nas bordas (Figura 4.14.e-f). Localmente com sombra de pressão formada por agregados de quartzo e mica. O tamanho varia de 200 μm a 500 μm .

Os **minerais opacos** ocorrem na forma de cristais subédricos a euédricos, distribuídos segundo a foliação principal por toda a rocha (Figura 4.14.a-e).

A paragênese mineral desse xisto peraluminoso, com clorita, cianita, moscovita e granada indica um metamorfismo do tipo barroviano, em temperaturas na transição da fácies xisto verde a anfibolito. Este xisto e o granada-estauroлита-clorita-moscovita-quartzo xisto pertencem ao Grupo Sabará, sendo que as amostras desse litotipo foram coletadas na borda SE do Quadrilátero Ferrífero, enquanto que amostras do litotipo anterior foram coletadas na porção N-NW. A presença da cianita permite estimar uma pressão $P > 3,0$ kbar para o metamorfismo dessa rocha (Deer *et al.*, 1992; Yardley, 1989).

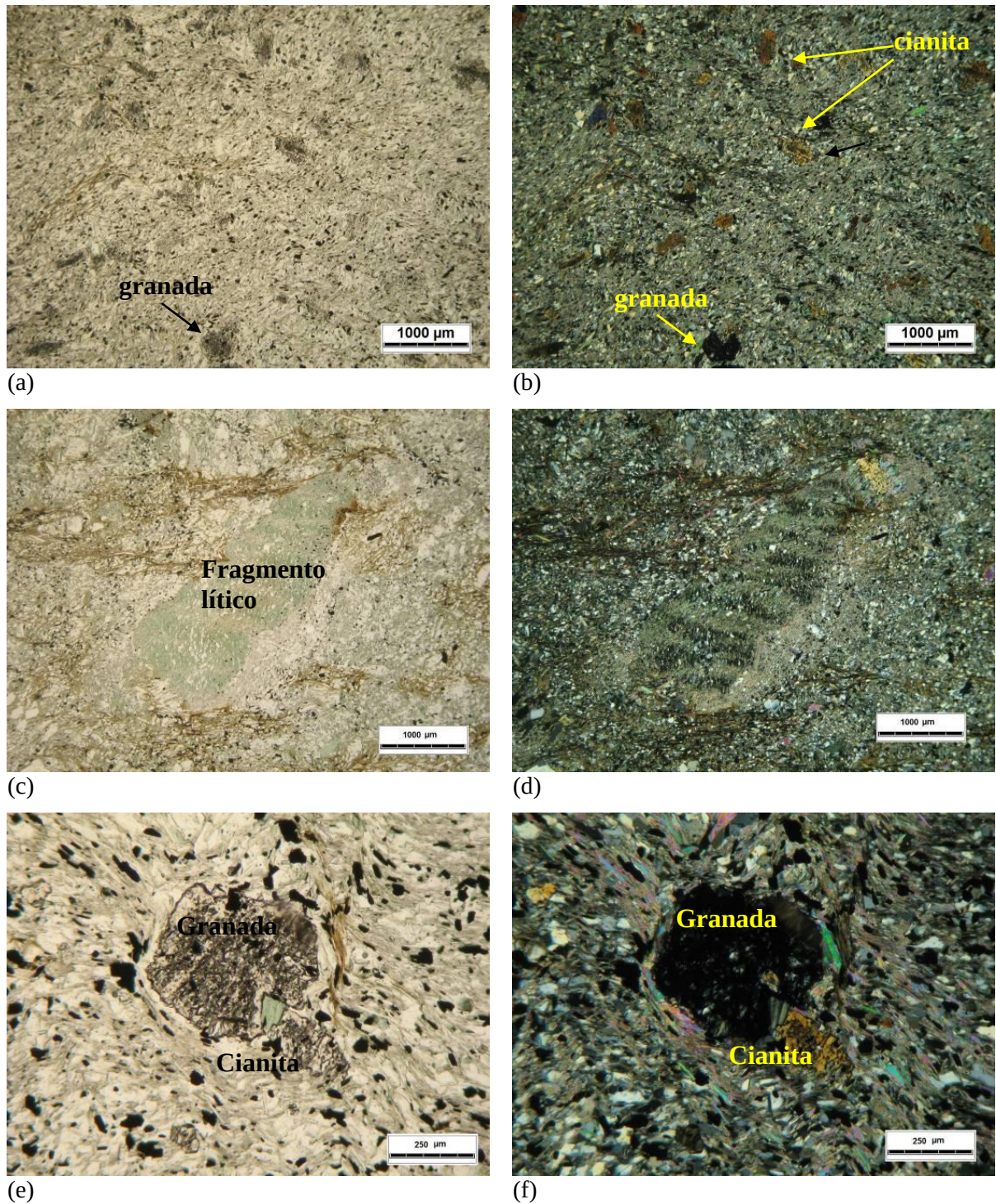


Figura 4.14 – Fotomicrografias de granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, coletado próximo a Passagem de Mariana: Aspecto geral da rocha com cristais de cianita e granada, (a) nicóis descruzados e (b) cruzados; (c) fragmento de filito crenulado em nicóis descruzados e (d) cruzados; (e) cristal de granada com inclusões de quartzo e contornado pela foliação, bordejado por palhetas de moscovita e associada com cristal de cianita e palheta de clorita, com coloração verde bem definida, nicóis descruzados e (f) cruzados.

Parâmetros geométricos dos cristais:

A granulação da rocha é definida por seus principais componentes, que são o quartzo e os filossilicatos clorita e moscovita. As medidas realizadas em lâminas delgadas indicaram que há uma variação do tamanho dos grãos de **quartzo** da ordem de 56%, com média de 30 μm , e uma assimetria para a esquerda, indicando predomínio de grãos menores (Tabela 4.3). Da mesma forma, as medidas de tamanho realizadas nos filossilicatos indicaram uma maior concentração de cristais menores. Embora essa classe de minerais já tenha uma tendência a formar cristais alongados, sua razão de alongamento, com valores na ordem de 7, é a maior do conjunto de rochas peraluminosas avaliadas.

Tabela 4.3 - Granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto: dados estatísticos descritivos para tamanho e razão de alongamento dos principais minerais.

Fase Mineral	Média μm	Coef. Variação %	Mínimo μm	Máximo μm	Assimetria	Taxa de alongamento
Quartzo	30	56	5	111	1,3	2,1
Clorita e Moscovita	84	63	12	274	1,0	7,0
Cianita	200	55	30	800	-0,3	-
Granada	350	27	200	500	-1,1	-
Opacos	40	29	20	50	-0,1	-

Nas páginas a seguir estão representados os resultados dos cálculos dos parâmetros geométricos para o quartzo e filossilicatos clorita e moscovita. Um sumário gráfico mostra a distribuição do tamanho dos cristais: a linha central da caixa corresponde à mediana, os traços verticais indicam os valores até 1,5 vezes a tendência central e os asteriscos (*) representam extremos (Figura 4.15.c). O gráfico de barras na Figura 4.15.d ilustra os percentuais de grãos alongados, sub-alongados e não alongados das principais fases minerais. O padrão de distribuição das orientações dos cristais no plano de foliação está representado em um histograma polar, na Figura 4.15.e. Os cristais de quartzo e filossilicatos, que são os minerais predominantes e que definem a foliação principal da rocha, exibem uma orientação bem definida, com baixa dispersão.

Na sequência, para cada fase mineral são apresentados um histograma com o padrão de distribuição dos tamanhos dos grãos e um histograma da razão de alongamento, calculada pela razão entre o comprimento do eixo maior pelo comprimento do eixo menor do cristal (Figuras 4.16 e 4.17).

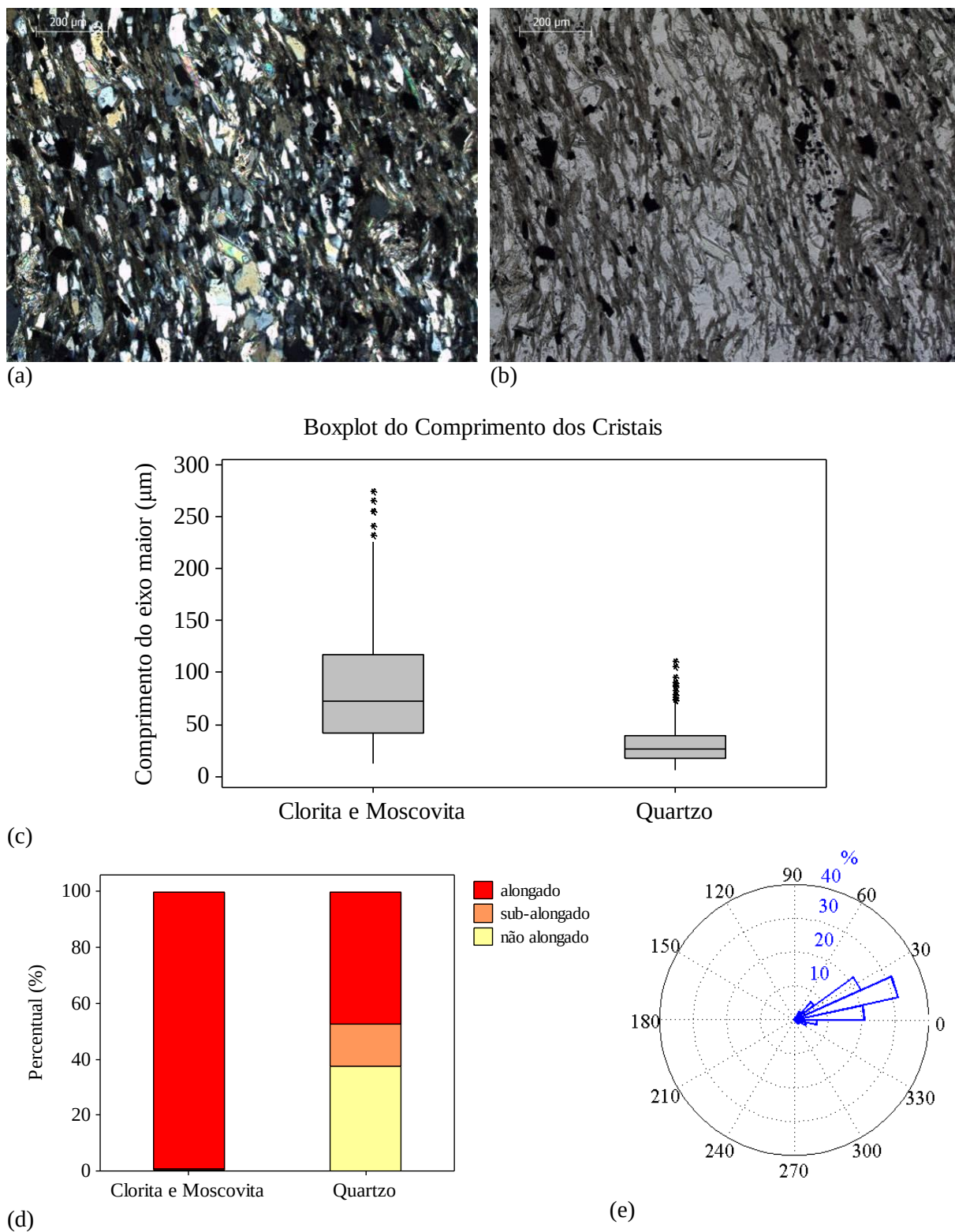
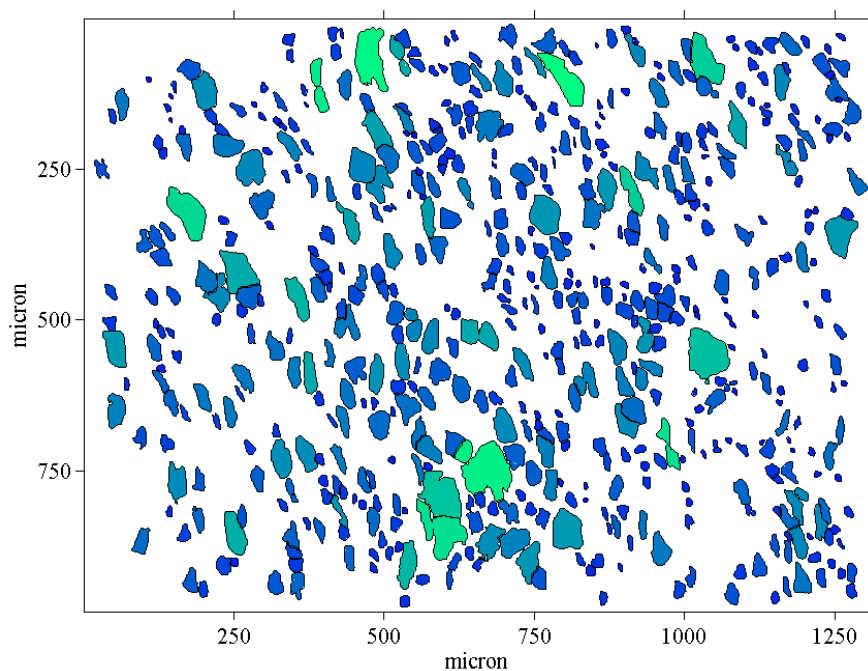
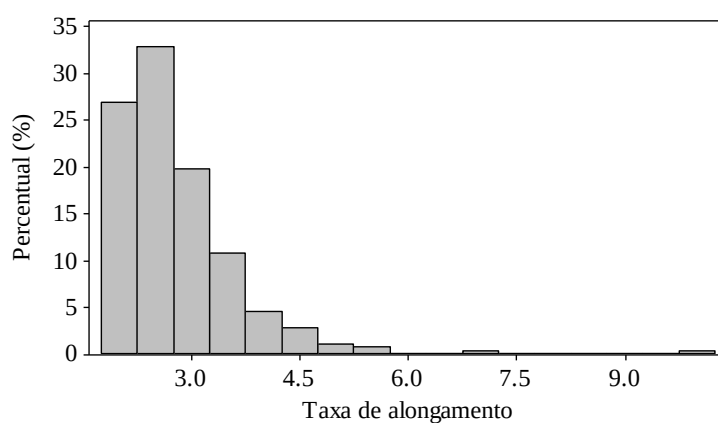


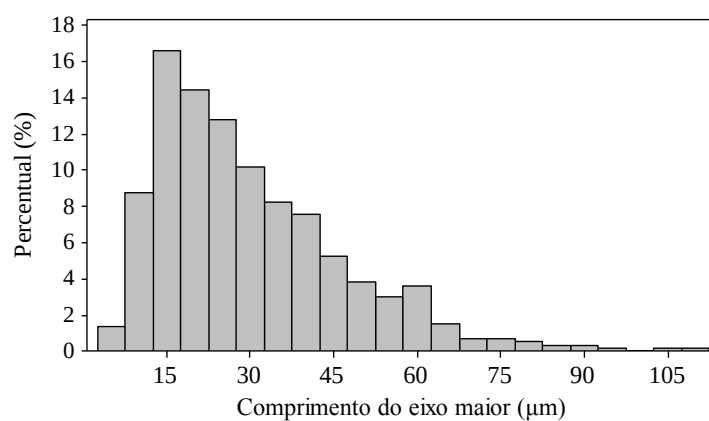
Figura 4.15 - Granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, coletado próximo a Passagem de Mariana-MG: (a) aspecto geral da rocha, 25x, nicóis cruzados e (b) descruzados; (c) sumário gráfico com a distribuição central e mediana na caixa e valores anômalos representados por asteriscos (*); (d) gráfico de barras a 100% com minerais classificados quanto ao alongamento; (e) diagrama polar com orientação dos minerais no plano de foliação.



(a)

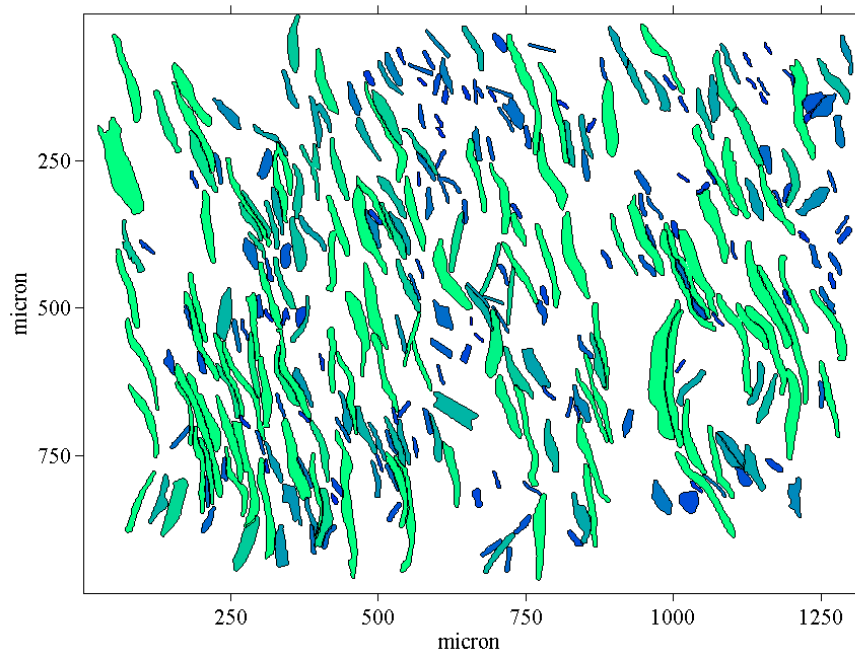


(b)

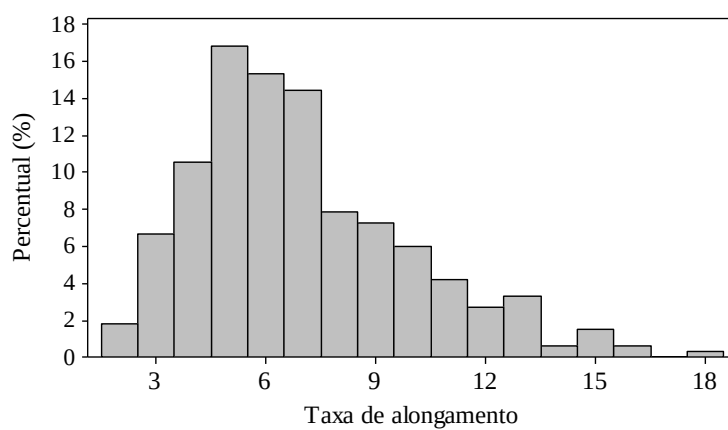


(c)

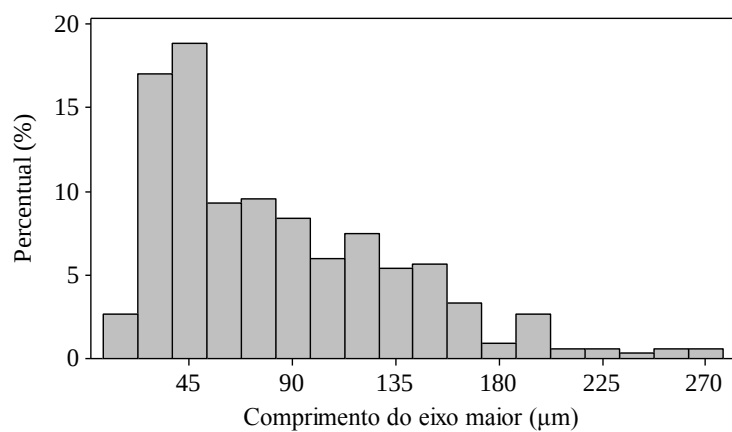
Figura 4.16 - Granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo-xisto: (a) imagem de cristais de quartzo individualizados; (b) histograma da razão de alongamento; (c) histograma do tamanho dos cristais.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.17 - Granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo-xisto: (a) imagem de cristais de clorita e moscovita individualizados; (b) histograma da razão de alongamento; (c) histograma do tamanho dos cristais.

4.1.4 Estauroлита-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, Araçuaí-MG

O estauroлита-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de Araçuaí, nordeste de MG, é uma rocha com granulação fina discretamente inequigranular. Apresenta textura granolepidoblástica e estruturação definida pela presença de bandamento milimétrico irregular, conferido pela concentração e pela variação do tamanho dos grãos de quartzo. A feição característica deste xisto é a presença de nódulos de quartzo e clorita milimétricos a submilimétricos dispersos por toda a rocha (Figura 4.18). A coloração é cinza escura quando seco e cinza muito escura quando molhado. A fissilidade não é pronunciada, devido ao bom embricamento entre os cristais e pela ausência de bandas bem definidas de filossilicatos. A rocha encontra-se pouco alterada e somente ao microscópio são observados filmes esparsos de óxidos/hidróxidos de ferro, preferencialmente entre os planos de foliação.



Figura 4.18 - Estauroлита-granada-clorita-biotita-quartzo xisto: aspecto macroscópico, onde se observa a presença de bandas mais claras alternadas a bandas escuras. Material coletado em pedreira localizada próximo à cidade de Araçuaí-MG.

O xisto estudado de Araçuaí apresenta sua composição mineralógica constituída predominantemente por quartzo (40-45%), biotita (20-25%), moscovita (15-20%) e clorita (10-15%), granada (menor que 5%) e estauroлита (menor que 1%), estes dois últimos importantes indicadores do metamorfismo e da aluminosidade da rocha. Foram observados também minerais opacos que representam menos que 1% da composição da rocha.

O **quartzo** apresenta-se na forma de cristais discretamente inequigranulares. Apresenta uma pequena variação de granulação, que define estratos intercalados entre si, onde o tamanho médio dos cristais varia de 50 μm nos níveis mais grossos a 20 μm nos níveis mais finos. Predominam os contatos intergrãos curvos.

A **biotita** apresenta duas gerações de cristais, a primeira representada por palhetas

finas orientadas segundo a foliação e a segunda geração na forma de blastos maiores, dispostos preferencialmente, mas nem sempre, paralelos à foliação. As biotitas apresentam forte pleocroísmo marrom escuro a marrom acastanhado e frequentemente contém halos pleocróicos ao redor de inclusões de zircão. Foi observada uma concentração de cristais de biotita nas bordas externas dos nódulos. Suas dimensões variam entre 20 μm e 100 μm para as palhetas finas e 100 μm a 200 μm para as maiores (Figura 4.19.b-c-d).

A **clorita** ocorre na forma de palhetas finas, orientadas segundo a foliação principal. Apresentam coloração verde clara e presença de leve pleocroísmo. Este filossilicato ocorre distribuído por toda a rocha, mas encontra-se predominantemente no interior e nas bordas nos nódulos, com maior concentração nas bordas (Figura 4.19.b-c).

A **moscovita** ocorre dispersa pela rocha sem uma orientação bem definida, com predomínio de palhetas finas a muito finas, com tamanho entre 20 μm e 40 μm e em palhetas maiores, em menor quantidade, com tamanho médio de 50 μm (Figura 4.19.f).

A **granada** ocorre na forma de cristais com faces bem definidas e com presença de inclusões de quartzo, que ocorrem dispersas nos cristais ou distribuídas de forma concêntrica (Figura 4.19.b-d).

A **estauroлита** foi observada na forma de cristais esqueletais, contendo inclusões de quartzo (Figura 4.19.e). Foram observados blastos com tamanhos entre 1,0 mm a 1,5 mm.

Os **minerais opacos** ocorrem em cristais dispersos por toda a rocha, alguns na forma de ripas (ilmenita), sendo observados níveis com maior concentração destes minerais (Figura 4.19.e-f).

As Figuras 4.19.b-c-d mostram os nódulos compostos por cristais de quartzo, clorita e opacos, que apresentam uma estrutura concêntrica, com maior presença de clorita nas bordas internas e concentração de biotita nas bordas externas, sendo que estas são, de modo geral, maiores do que aquelas presentes no restante da rocha.

Com base em observações petrográficas, Costa (1990) descreve para a região entre Coronel Murta, a oeste, e Itinga, a leste, um evento metamórfico do tipo regional intermediário de baixa pressão, com condições de P-T de fácies anfibolito e gradiente metamórfico crescente de oeste para leste, com decréscimo de pressão e aumento de temperatura. As amostras de estauroлита-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, coletadas próximo à cidade de Araçuaí, localizam-se entre esses limites e apresentam uma paragênese mineral que corresponde à zona da granada-estauroлита, com temperatura entre 548,2°C (Thompson, 1976) e 591,4°C (Hoinkes, 1986) e pressão entre 5,55 kbar (Ghent, 1976) e 5,57 kbar (Aranovich & Podlesski, 1981), conforme estudo realizado por Costa (1990).

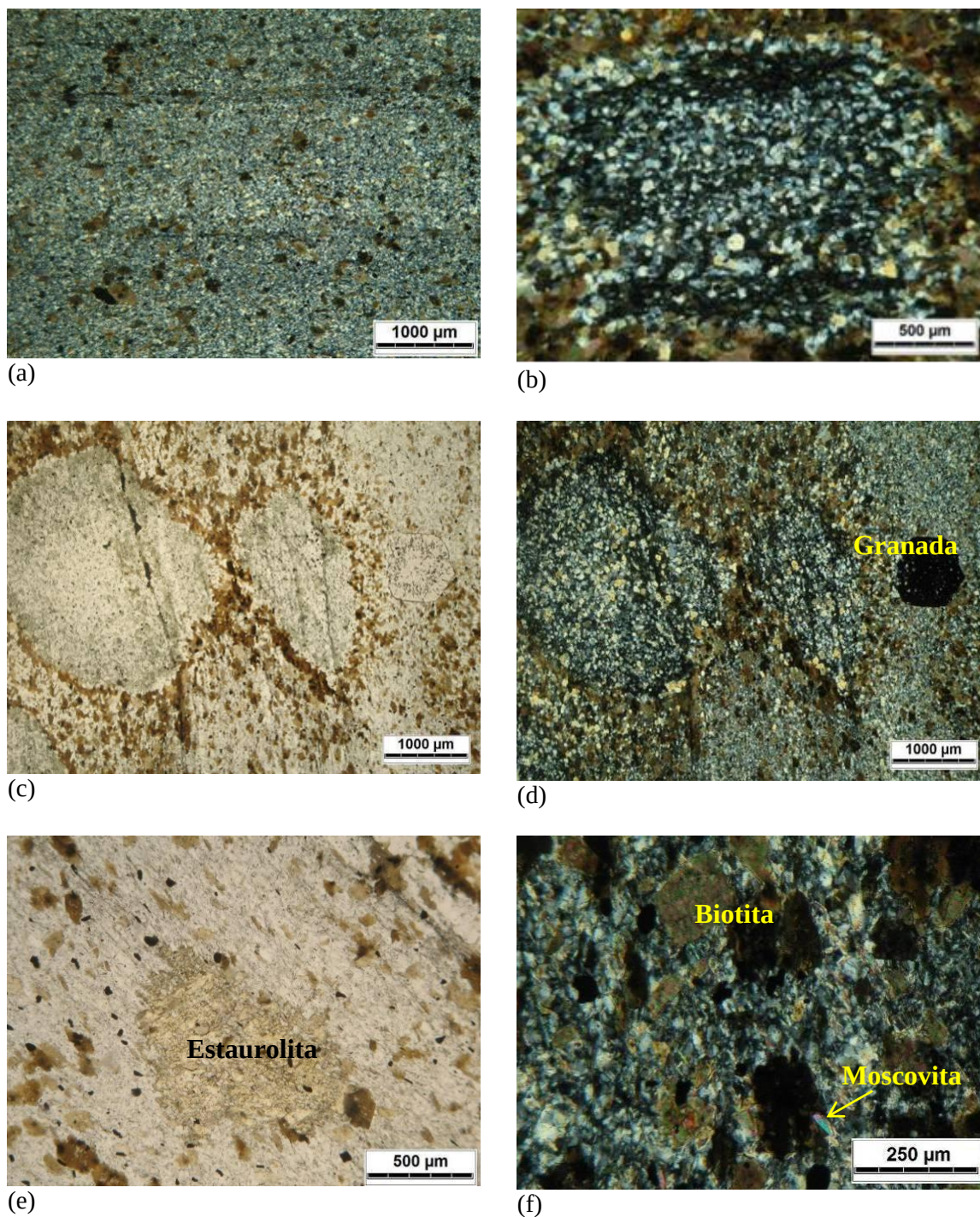


Figura 4.19 - Fotomicrografias de estauroлита-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo a Araçuaí-MG: (a) aspecto geral da rocha com discreto bandamento granulométrico e composicional, nicóis cruzados; (b) nódulo com palhetas orientadas de clorita com maior concentração nas bordas, nicóis cruzados; (c) nódulos milimétricos de quartzo+clorita e bordas de biotita e cristal de granada, nicóis descruzados e (d) nicóis cruzados; (e) cristal de estauroлита e cristais de biotita na forma de palhetas orientadas segundo a foliação e blastos maiores, nicóis descruzados; (f) aspecto da matriz com finos grãos de quartzo, palhetas de biotita, grãos de minerais opacos e palhetas mais finas de moscovita, nicóis cruzados.

Parâmetros geométricos dos cristais:

A granulação da rocha é definida por seus principais componentes, que são o quartzo e a biotita e os nódulos de quartzo+clorita. As medidas realizadas indicam que há uma variação do tamanho dos grãos de **quartzo** da ordem de 55%, com média de 34 μm e valores mínimo de 10 μm e máximo de 146 μm . Os dados estatísticos mostram uma assimetria para valores inferiores na distribuição dos tamanhos dos cristais de quartzo, indicando um predomínio de grãos menores. Observam-se duas populações de biotita: a primeira formada por palhetas mais finas e alongadas, com tamanho médio de 118 μm , com mínimo de 29 μm e máximo de 261 μm ; a segunda população formada por blastos maiores, cujo tamanho varia de 186 μm a 600 μm . Os nódulos de quartzo-clorita têm tamanho médio de 3 mm e os cristais de granada de 800 μm (Tabela 4.4). Os padrões de distribuição dos tamanhos de grãos dos minerais podem ser observados nos histogramas das Figuras 4.21 e 4.22.

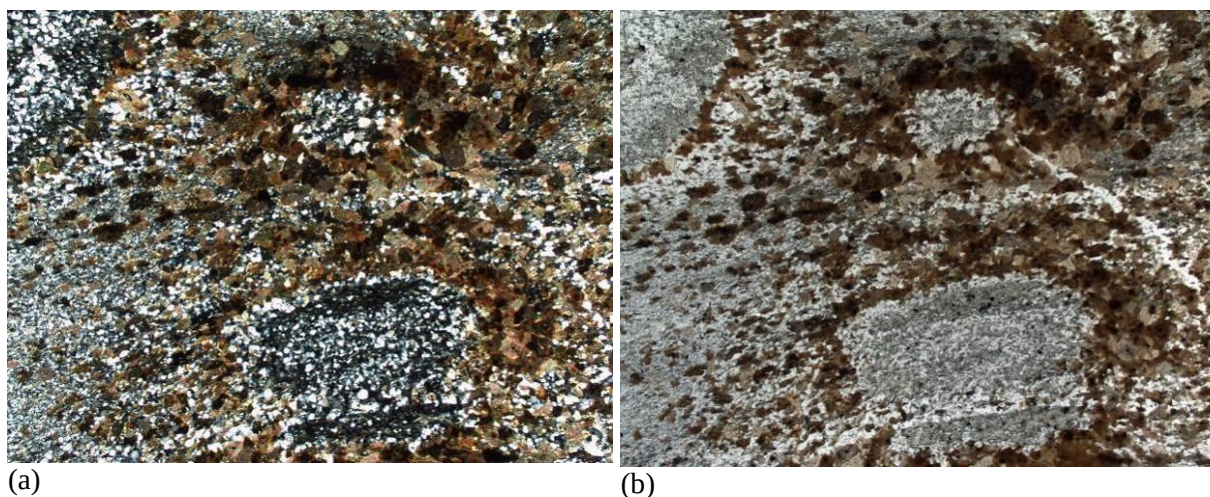
Tabela 4.4 - Estauroлита-granada-clorita-biotita-quartzo xisto: dados estatísticos descritivos para tamanho dos principais minerais.

Fase Mineral	Média μm	Coef. Variação %	Mínimo μm	Máximo μm	Assimetria	Alongamento
Quartzo	34	55	10	146	1,5	1,6
Biotita menor	118	36	29	261	0,5	2,2
Biotita maior	312	29	186	604	0,8	2,0
Clorita	74	32	21	196	1,0	3,7
Granada	780	5	730	810	-	-
Nódulos	2800	22	2000	4560	-	-

Nas páginas a seguir estão ilustrados os resultados dos cálculos dos parâmetros geométricos para os principais minerais constituintes da rocha. Um sumário gráfico mostra a distribuição do tamanho dos cristais das fases minerais: a linha central da caixa corresponde à mediana, os traços verticais indicam os valores até 1,5 vezes a tendência central e os asteriscos (*) representam extremos (Figura 4.20.c). Quanto ao alongamento dos cristais, o gráfico de barras na Figura 4.20.d ilustra os percentuais de grãos alongados, sub-alongados e não alongados das principais fases minerais. O padrão de distribuição das orientações dos cristais no plano de foliação está representado em um histograma polar (Figura 4.20.e). Os minerais predominantes na rocha exibem uma orientação bem definida, com baixa dispersão.

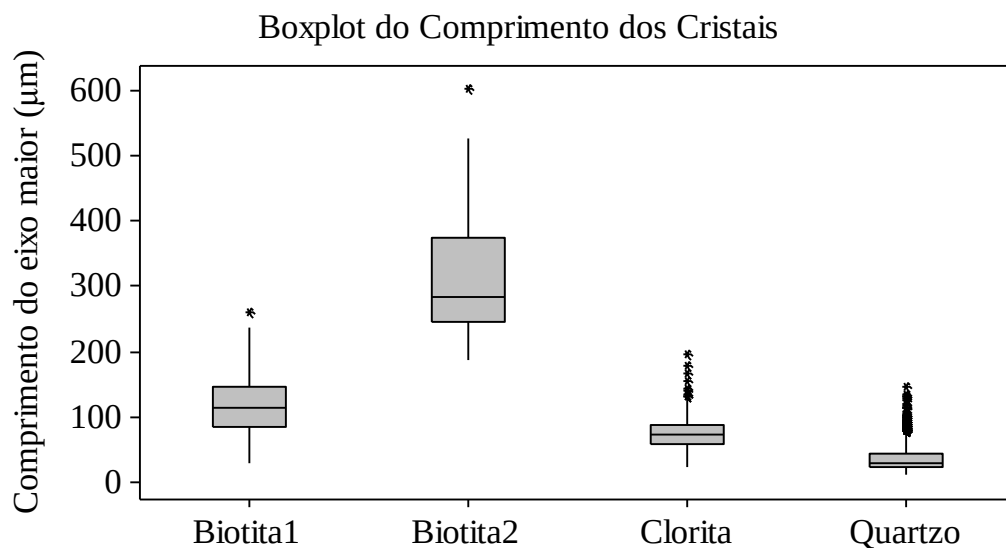
Na sequência, para cada fase mineral são apresentados um histograma com a distribuição dos tamanhos dos grãos e um histograma da razão de alongamento, calculada pela razão entre o comprimento do eixo maior pelo comprimento do eixo menor do cristal. (Figuras 4.21 e 4.22). Entre as duas populações de biotita, os cristais maiores apresentam-se

menos alongados do que os cristais menores (Figuras 4.22.b-c).

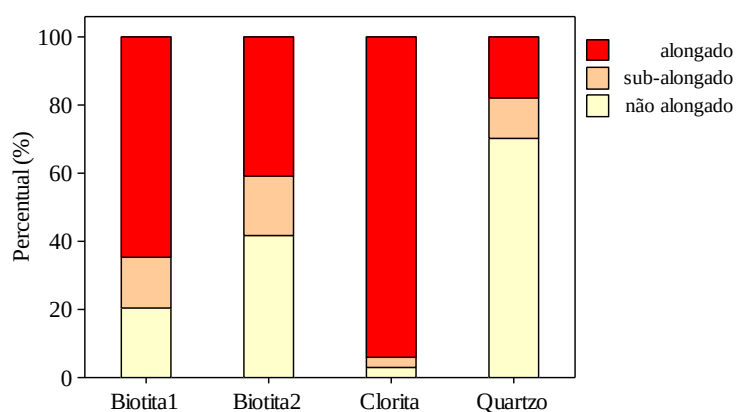


(a)

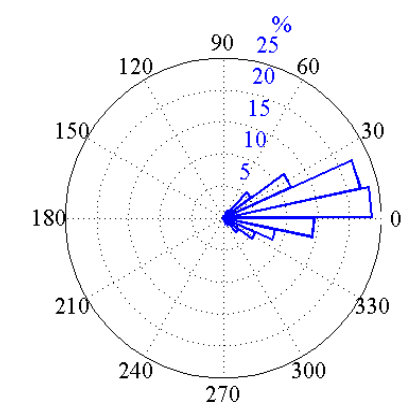
(b)



(c)

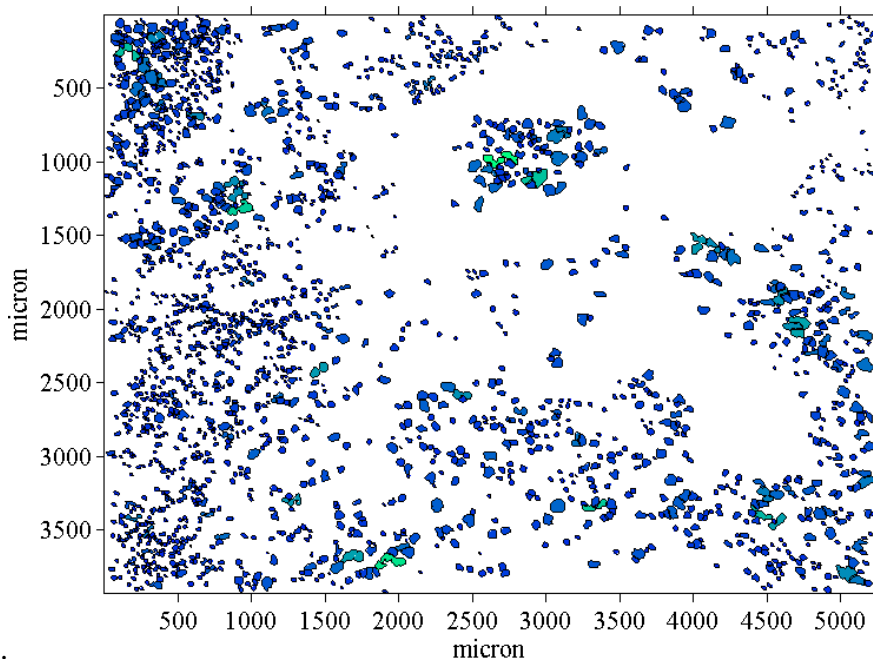


(d)

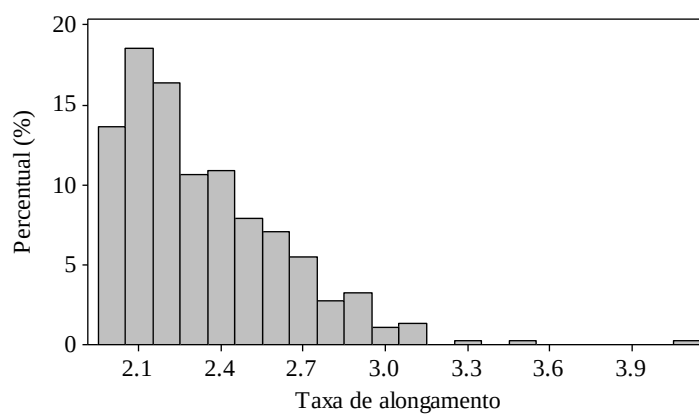


(e)

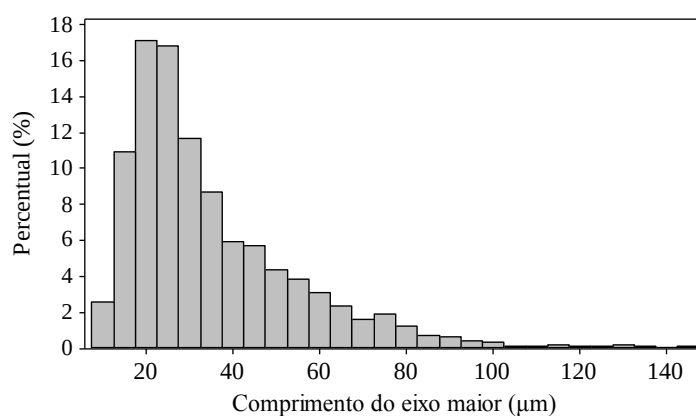
Figura 4.20 - Estauroлита-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo a Araçuaí-MG: (a) aspecto geral da rocha, 25x, nicóis cruzados (a) e (b) descruzados; (c) sumário gráfico com distribuição central e mediana na caixa e valores anômalos representados por asteriscos (*); (d) gráfico de barras a 100% com minerais classificados quanto ao alongamento; (e) diagrama polar com orientação dos minerais no plano de foliação.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.21 - Estauroлита-граната-сорита-биотита-кварто зисто: (a) имегем де кристайс де кварто индивидуализадос; (b) истограма да разão де alongamento; (c) истограма до таманхо до кристайс.

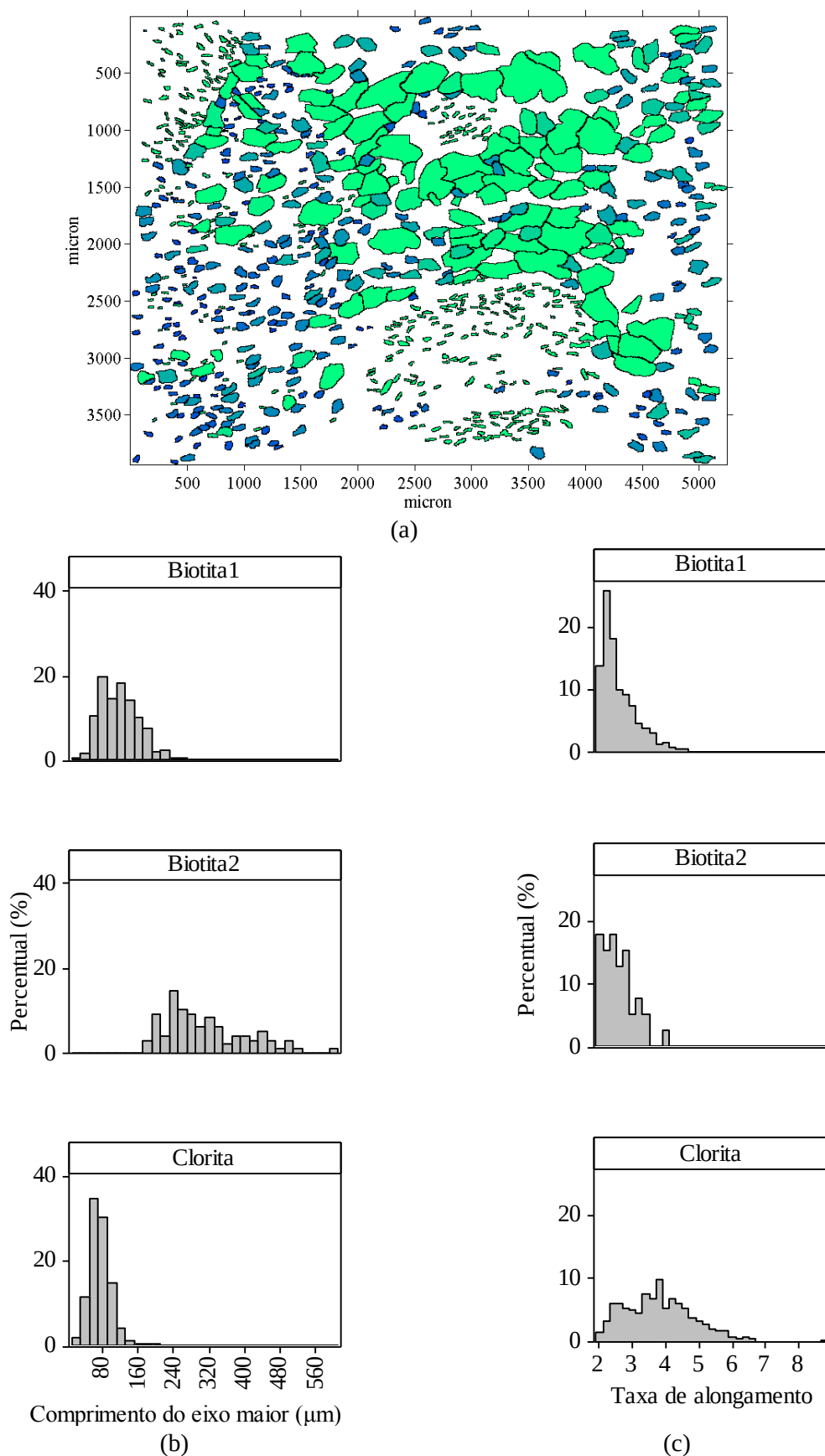


Figura 4.22- Estauroлита-granada-clorita-biotita-quartzо xisto: (a) imagem de cristais de filossilicatos biotita 1 (menor), biotita 2 (maior) e clorita; (b) histogramas da razão de alongamento; (c) histogramas dos tamanhos dos cristais.

4.1.5 Cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, Itinga-MG

O cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de Itinga-MG, é uma rocha que apresenta textura granolepidoblástica e coloração cinza quando seco e cinza escuro quando úmida. Caracteriza-se pela associação de minerais de granulação fina em conjunto com porfiroblastos milimétricos a centimétricos de andaluzita e de cordierita. Esses estão dispostos no plano de foliação, mas não definem uma lineação, e conferem à rocha um aspecto estético exótico (Figura 4.23).

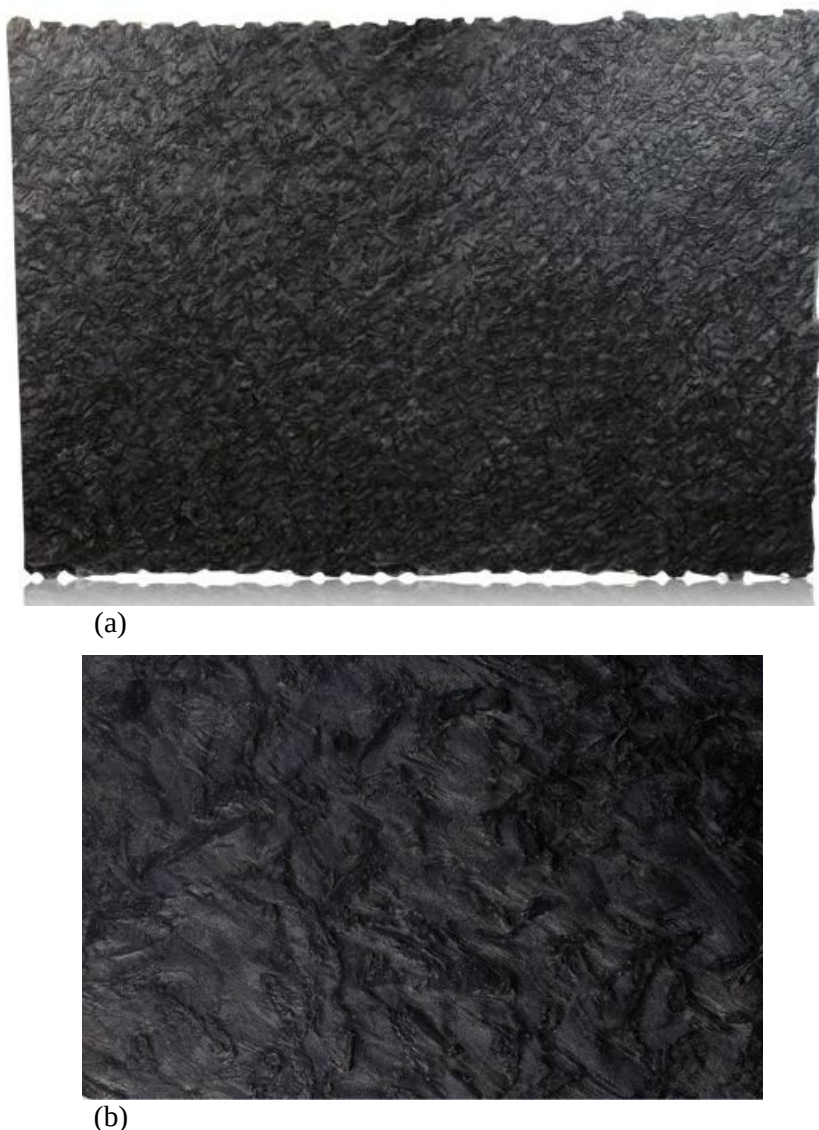


Figura 4.23 - Cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto: aspecto macroscópico de chapa com acabamento escovado (a) e detalhe do mesmo material (b), nome comercial “Matrix”. Catálogo de produtos da empresa Serraria de Mármore Santo Antônio Ltda., ano: 2008.

É uma rocha composta predominantemente por quartzo (40-45%) e biotita (35-40%), seguidos de moscovita (5-8%) e porfiroblastos de andaluzita (5-15%) e de cordierita (2-7%). Ao microscópio petrográfico observa-se a existência de um bandamento composicional, com alternância de níveis ricos em quartzo, com textura granoblástica, e níveis com biotita e

moscovita, lepidoblásticos. Este bandamento, associado a uma xistosidade bem desenvolvida, confere ao material uma marcante fissilidade. O microfissuramento é baixo a incipiente e a rocha não apresenta alteração importante.

O **quartzo** ocorre na forma de cristais equidimensionais, com predominância de contatos intergrãos retos, em algumas regiões poligonais com junção tríplice, e na forma de grãos alongados, orientados segundo a foliação principal. Os grãos não alongados representam cerca de 40% do total. Os cristais alongados, que são cerca de 50% do total, ocorrem preferencialmente onde há maior concentração de biotitas (Figura 4.24.b). Foram observados, em menor quantidade, contatos curvos e interlobados entre cristais.

A **biotita** ocorre na forma de palhetas orientadas, com coloração castanha, forte pleocroísmo e frequente presença de halos pleocróicos ao redor de inclusões de zircão. É a mica predominante na rocha e define a foliação (Figura 4.24.a-b).

A **moscovita** ocorre na forma de palhetas menores e em menor quantidade que a biotita. Encontra-se distribuída de forma homogênea por toda a rocha e sem orientação preferencial (Figura 4.24.f).

A **andaluzita** é identificada por seu relevo alto e cor de interferência cinza de primeira ordem. Ocorre na forma de poiquiloblastos onde foram identificadas inclusões de quartzo, granada e biotita. O padrão de inclusões mostra-se concordante com a foliação principal (Figura 4.24.c-d).

A **cordierita** ocorre na forma de poiquiloblastos, com cor de interferência cinza de primeira ordem e, ao contrário da andaluzita, mostra relevo próximo ao do quartzo (Figura 4.24.e-f). Minúsculos cristais de zircão formam halos pleocróicos dentro da cordierita e confirmam a identificação da mesma.

A **granada** ocorre na forma de finos grãos dispersos na rocha ou como inclusões nos poiquiloblastos de andaluzita e de cordierita.

O cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto está situado a leste do estauroлита-granada-clorita-biotita-quartzo xisto (Araçuaí), no mesmo domínio de metamorfismo regional intermediário de baixa pressão, em condições de P-T da fácies anfíbolito. Esses dois litotipos enquadram-se em um ambiente de metamorfismo progressivo crescente de oeste para leste, com decréscimo dos valores de pressão e aumento de temperatura conforme definido por Costa (1990), com base em observações petrográficas e cálculos geotermobarométricos. Para pelitos submetidos a metamorfismo de baixa pressão, Yardley (1989) descreve uma reação onde: $\text{clorita} + \text{moscovita} + \text{quartzo} \rightarrow \text{cordierita} + \text{andaluzita} + \text{biotita} + \text{H}_2\text{O}$. O local de coleta do presente xisto situa-se na zona da andaluzita-

cordierita, com temperaturas calculadas por Costa (1990) entre $530 \pm 20^\circ\text{C}$ (Spear, 1980) a 741°C (Perchuk *et. al*, 1981) e pressões entre 2,2 kbar e 4,7 kbar.

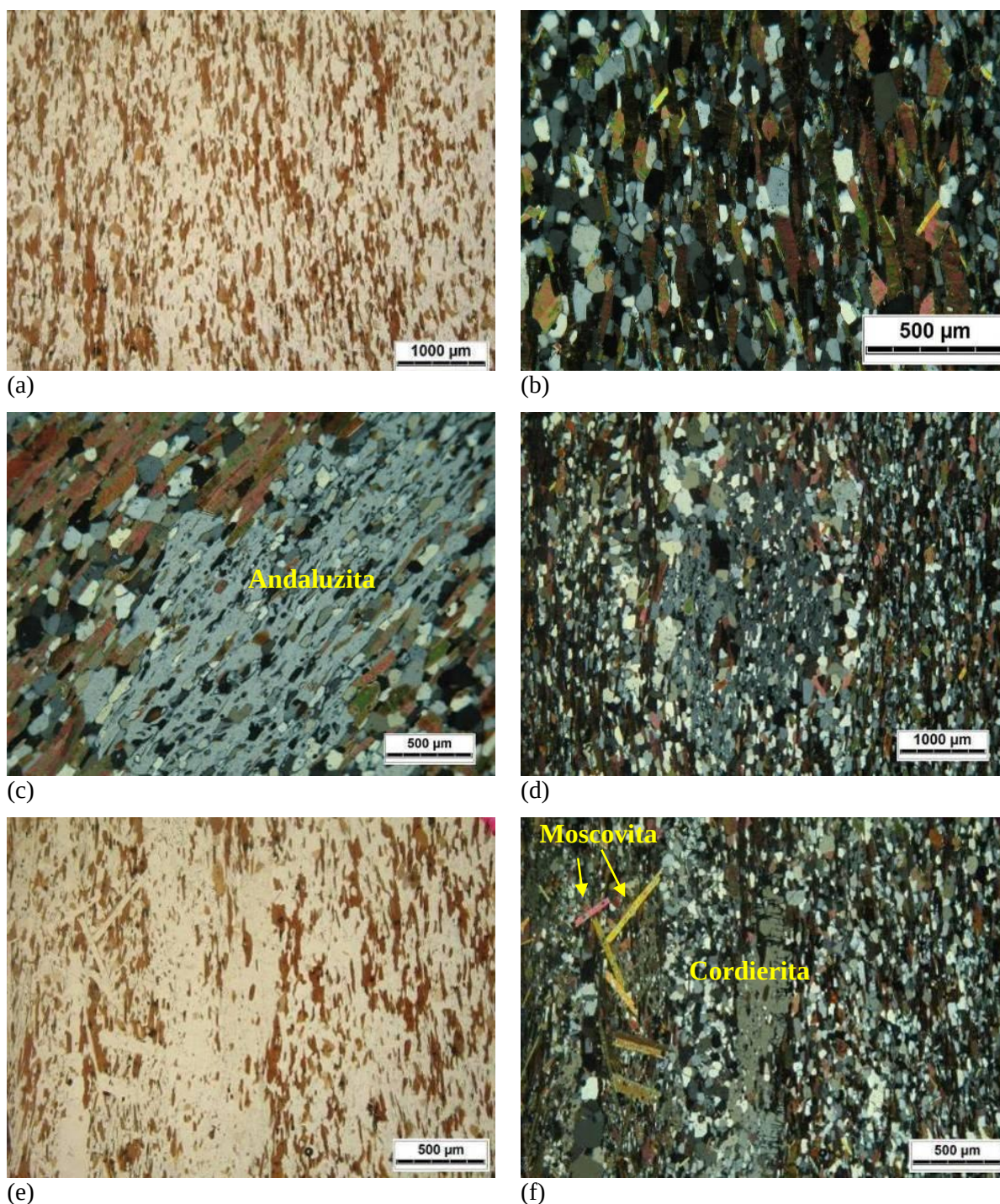


Figura 4.24 - Fotomicrografias de cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo a Itinga-MG: (a) aspecto geral da rocha onde se observam bandas com maior concentração de biotita e bandas de quartzo, nicóis descruzados; (b) aspecto textural da rocha, mostrando as palhetas orientadas de biotita e a variação de forma e tamanho dos grãos de quartzo, nicóis cruzados; (c) porfiroblasto de andaluzita orientado segundo a foliação, nicóis cruzados; (d) detalhe do porfiroblasto de andaluzita com inclusões de quartzo e biotita, nicóis cruzados; (e) porfiroblasto de cordierita (centro da foto) e palhetas de moscovita transversais à foliação (esquerda), nicóis descruzados; e (f) mesmo local, com nicóis cruzados.

Parâmetros geométricos dos cristais:

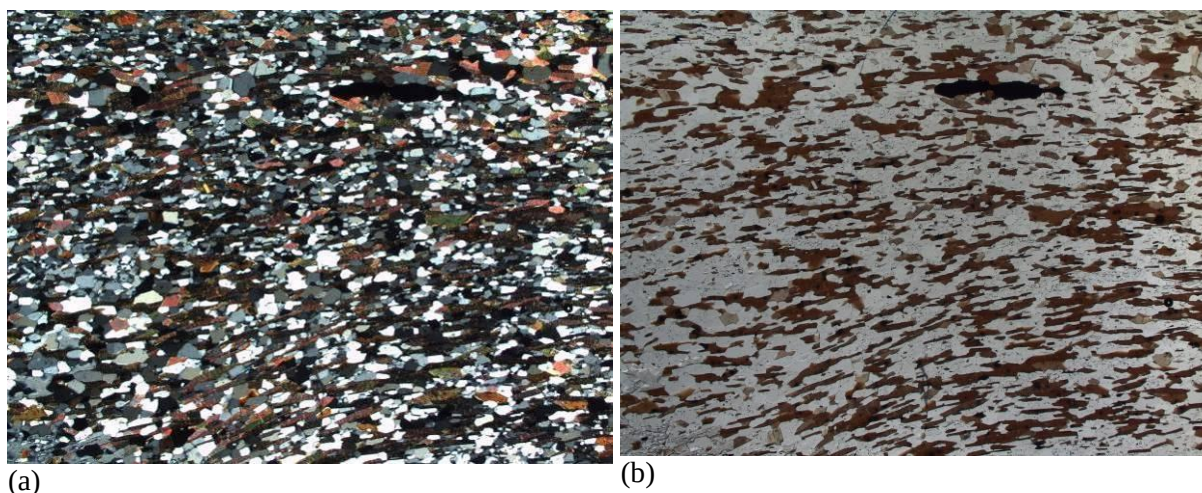
A granulação da rocha é definida por seus principais componentes, que são: quartzo, biotita, porfiroblastos de andaluzita e subordinadamente, porfiroblastos de cordierita. As medidas realizadas indicam que há uma variação do tamanho dos grãos de quartzo da ordem de 51%, com média de 80 μm , valor mínimo de 18 μm e máximo de 303 μm . Os dados estatísticos descritivos mostram uma assimetria para a esquerda na distribuição dos tamanhos dos cristais de quartzo, indicando um predomínio de grãos menores. Para a biotita o valor médio é de 170 μm , com mínimo de 21 μm e máximo de 716 μm . Há também um predomínio de cristais menores, mas o intervalo de tamanhos é menor (Tabela 4.5). Os padrões de distribuição podem ser observados nos histogramas das Figuras 4.26.c e 4.27.c. Para os poiquiloblastos de andaluzita e cordierita, medidas realizadas no microscópio óptico resultaram em valores com comprimento médio de 6 mm, mas macroscopicamente foram identificados porfiroblastos de andaluzita com tamanhos entre 20 e 70 mm, tamanho médio de 40 mm. Os porfiroblastos de cordierita são menores em relação aos de andaluzita e foram medidos cristais com tamanhos entre 15 a 30 mm, com tamanho médio de 20 mm.

Tabela 4.5 - Cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto: dados estatísticos descritivos para tamanho dos principais minerais.

Fase Mineral	Média μm	Coef. Variação %	Mínimo μm	Máximo μm	Assimetria	Taxa de alongamento
Quartzo	80	51	18	303	1,2	2,1
Biotita	170	59	21	716	1,2	3,9

Nas páginas a seguir estão ilustrados os resultados dos cálculos dos parâmetros geométricos para os principais minerais constituintes da rocha. Um sumário gráfico mostra a distribuição do tamanho dos cristais das fases minerais: a linha central da caixa corresponde à mediana, os traços verticais indicam os valores até 1,5 vezes a tendência central e os asteriscos (*) representam extremos (Figura 4.25.c). Quanto ao alongamento dos cristais, o gráfico de barras na Figura 4.25.d ilustra os percentuais de grãos alongados, sub-alongados e não alongados das principais fases minerais. O padrão de distribuição das orientações dos cristais no plano de foliação está representado em um histograma polar, na Figura 4.25.e. Os cristais de quartzo e filossilicatos, que são os minerais predominantes na rocha, exibem uma orientação bem definida, com baixa dispersão.

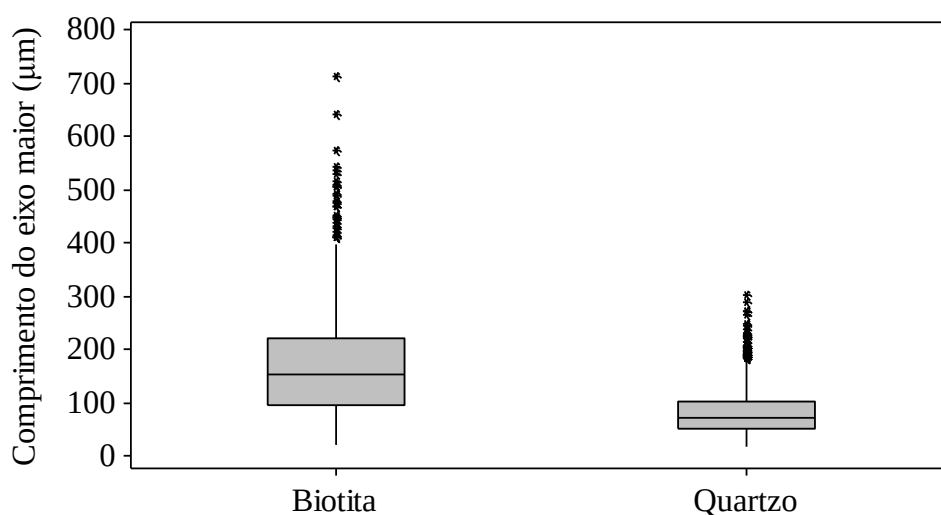
Para cada fase mineral são apresentados o histograma com a distribuição dos tamanhos dos grãos e o histograma da razão de alongamento, calculada pela razão entre o comprimento do eixo maior pelo comprimento do eixo menor do cristal. (Figuras 4.26 e 4.27).



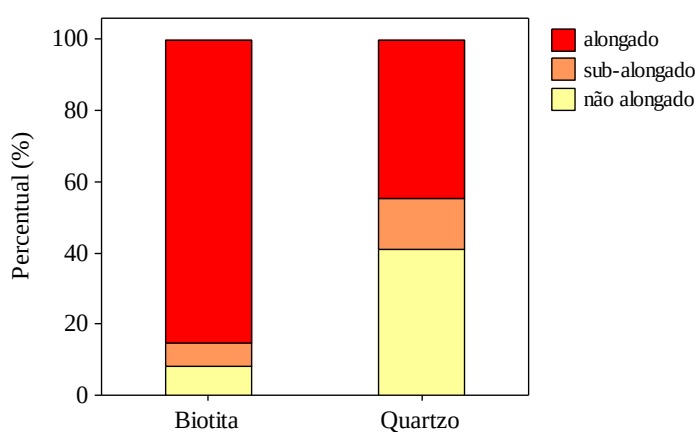
(a)

(b)

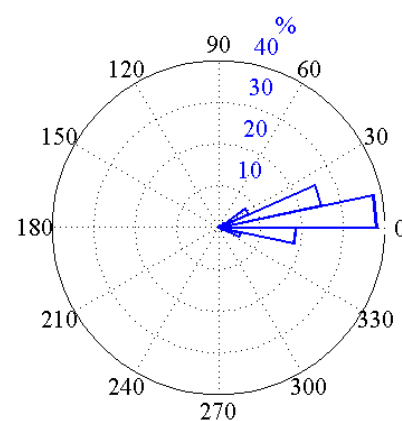
Boxplot do Comprimento dos Cristais



(c)

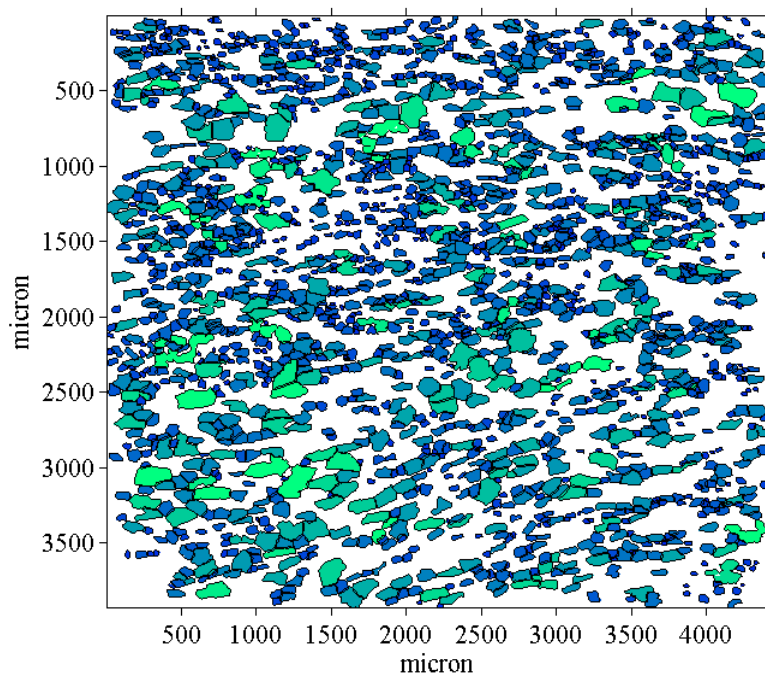


(d)

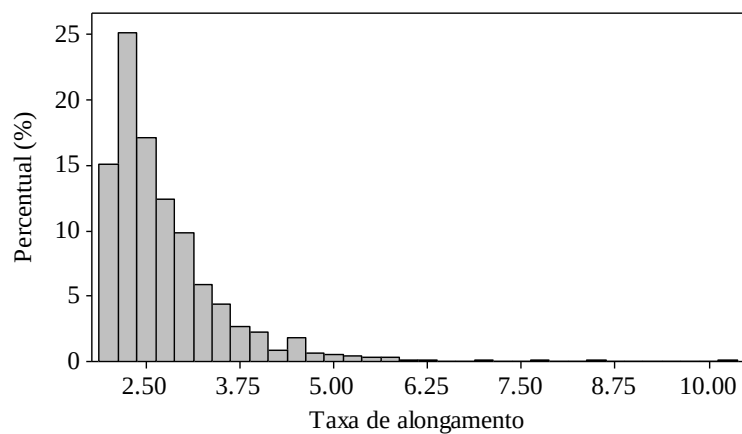


(e)

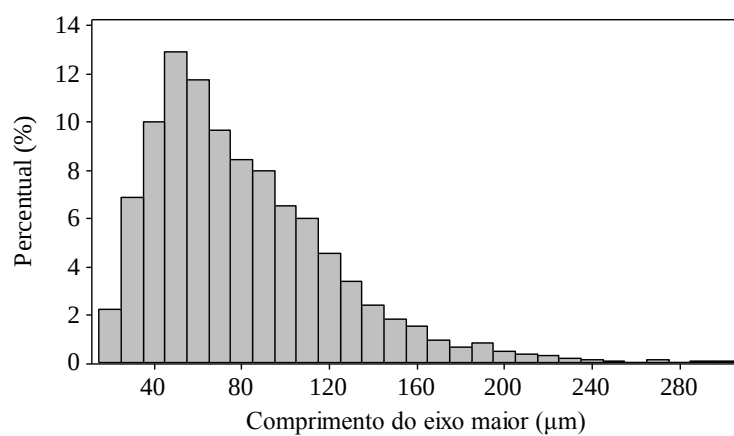
Figura 4.25 - Cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo a Itinga-MG: (a) aspecto geral da rocha, 25x, nicóis cruzados e (b) descruzados; (c) sumário gráfico com distribuição central e mediana na caixa e valores anômalos representados por asteriscos (*); (d) gráfico de barras a 100% com minerais classificados quanto ao alongamento; (e); diagrama polar com orientação dos minerais no plano de foliação.



(a)

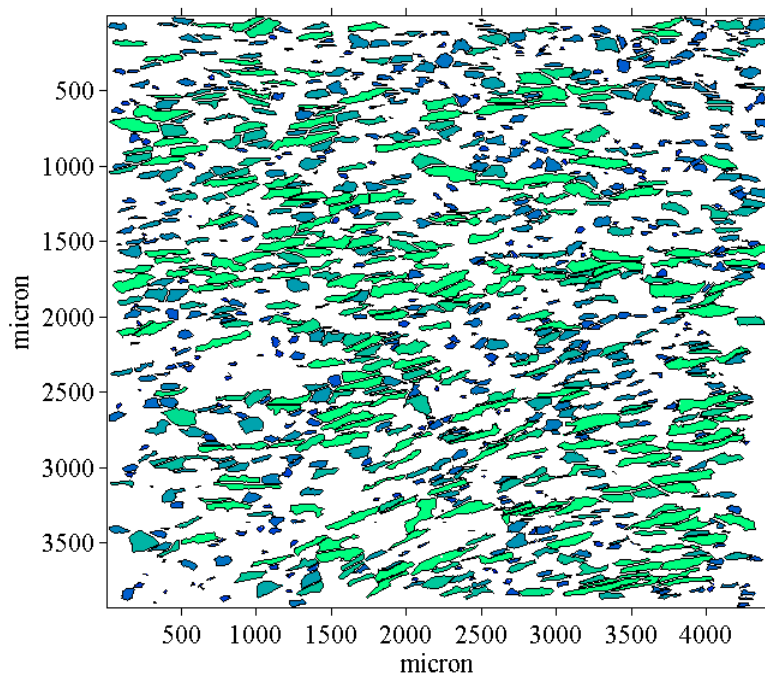


(b)

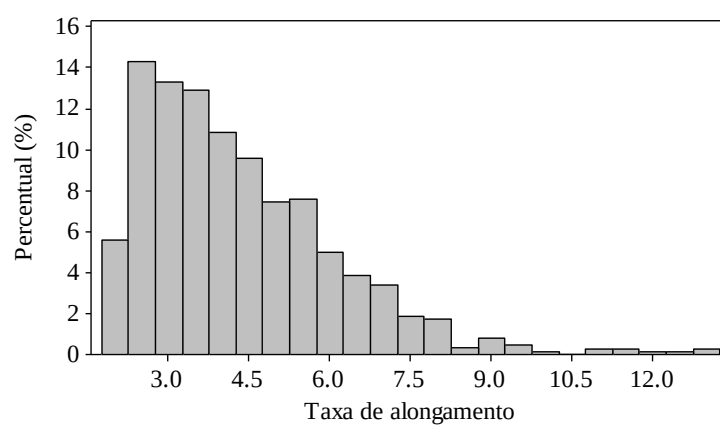


(c)

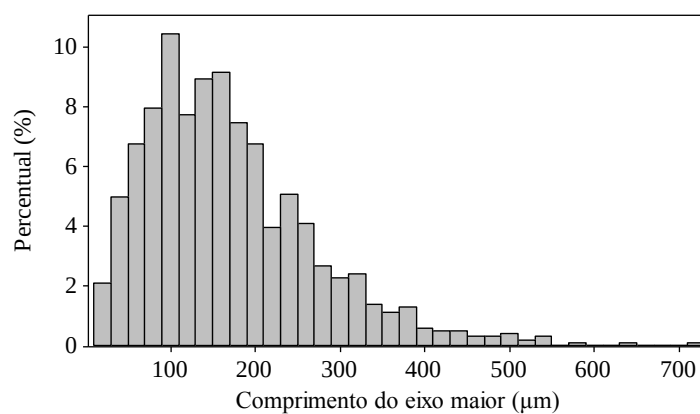
Figura 4.26 - Cordierita-andaluzita-biotita-quartzo xisto: (a) imagem de cristais de quartzo individualizados; (b) histograma da razão de alongamento; (c) diagrama polar com orientação dos cristais alongados; (d) histograma do tamanho dos cristais.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.27 - Cordierita-andaluzita-biotita-quartzo xisto: (a) imagem de cristais de biotita individualizados; (b) histograma da razão de alongamento; (c) histograma do tamanho dos cristais.

4.1.6 Xisto verde, Caeté-MG

Como representante do grupo composicional do xisto verde, foi avaliado um metabasalto da base do Supergrupo Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, cujos resultados são apresentados a seguir.

Amostras do albita-carbonato-clorita-quartzo xisto foram coletadas próximo às cidades mineiras de Caeté e Sabará. Trata-se de uma rocha de granulação fina e textura granolepidoblástica, com coloração cinza esverdeado a cinza esverdeado escuro quando úmido. Têm como aspecto característico a presença de bandas descontínuas de carbonatos, com espessura milimétrica (Figura 4.28). É constituído por quartzo (25-30%), carbonato (20-25%), clorita (20-25%), albita (10-15%), sericita (10-15%), epidoto (1-2%) e opacos (1-2%), esses últimos representados principalmente por cristais de pirita.



Figura 4.28 - Albita-carbonato-clorita-quartzo xisto: aspecto macroscópico onde podem ser observados os filmes de material carbonáticos. Amostra coletada entre as cidades de Caeté-MG e Sabará-MG.

O **quartzo** ocorre disseminado por toda a rocha, na forma de cristais equidimensionais, onde se observam predominantemente contatos curvos e interlobados entre grãos. Subordinadamente há regiões onde os contatos são retos com junção tríplice, geralmente associados às bandas carbonáticas.

O **carbonato** ocorre como cristais bem formados sem microfissuras ou alteração. Os contatos intergrãos são predominantemente retos, por vezes poligonais com tríplice junção. Também foram observados contatos curvos e interlobados. Distribuem-se pela rocha

concentrados em faixas descontínuas, de forma geral concordantes com a foliação, com espessuras milimétricas. Ao microscópio eletrônico de varredura, leituras de EDS indicaram um carbonato de Fe.

O plagioclásio **albita** ocorre na forma de cristais bem formados, com geminação polissintética, alguns com macla de Carlsbad (Figura 4.29.e-f). Encontra-se frequentemente alterada, com inclusões de sericita. Predomínio de contatos curvos e subordinadamente interlobados entre grãos.

A **clorita** ocorre na forma de palhetas finas orientadas com a foliação, com coloração verde e pleocroísmo bem definidos, indicativos de uma Fe-clorita. De modo geral, os cristais maiores são observados nas bordas de cristais euédricos de pirita.

A **mica branca** ocorre predominantemente como sericita na forma de palhetas muito finas dispersas na rocha e como produto de alteração do plagioclásio. Foram observadas palhetas maiores em menor quantidade.

Esporadicamente são observados cristais de **biotita**, que apresentam inclusões de quartzo e bordas de clorita. São cristais pouco alongados, com pleocroísmo discreto em tons de castanho (Figura 4.29.g-h).

Os **minerais opacos** ocorrem na forma de cristais subédricos a euédricos, com predomínio dos últimos, sendo comum a presença de cristais bem formados de pirita com bordas de clorita (Figura 4.29.c-d). Ao microscópio eletrônico de varredura, leituras de EDS confirmaram a identificação da pirita.

O **epidoto** ocorre na forma de cristais subédricos a euédricos, com relevo alto e cor de interferência característica (Figura 4.29.d).

Os minerais presentes nessa rocha, com clorita, albita, quartzo, carbonato e, em menor quantidade, o epidoto e a biotita, formam assembleias típicas de zonas barrovianas da clorita e biotita, fácies xisto verde, para metabasitos, conforme descrito por Wiseman (1934, *apud* Yardley, 1989). Essa assembleia indica metamorfismo com temperaturas entre 350 a 450 °C e estável em um intervalo de pressão de até 4 kbar (Spear, 1995). Para corresponder a materiais utilizados em monumentos históricos, avaliados nos estudos de caso, foram coletadas amostras submetidas à alteração hidrotermal na zona da carbonatação, como indica a presença de níveis carbonáticos e sulfeto pirita. A distribuição do processo hidrotermal em zonas foi identificada por autores que estudaram os depósitos auríferos hospedados em rochas do Supergrupo Rio das Velhas, como Lamego e Cuiabá, onde os metabasaltos constituem o *footwall* (Ribeiro-Rodrigues, 1998; Lobato *et al.*, 2001b).

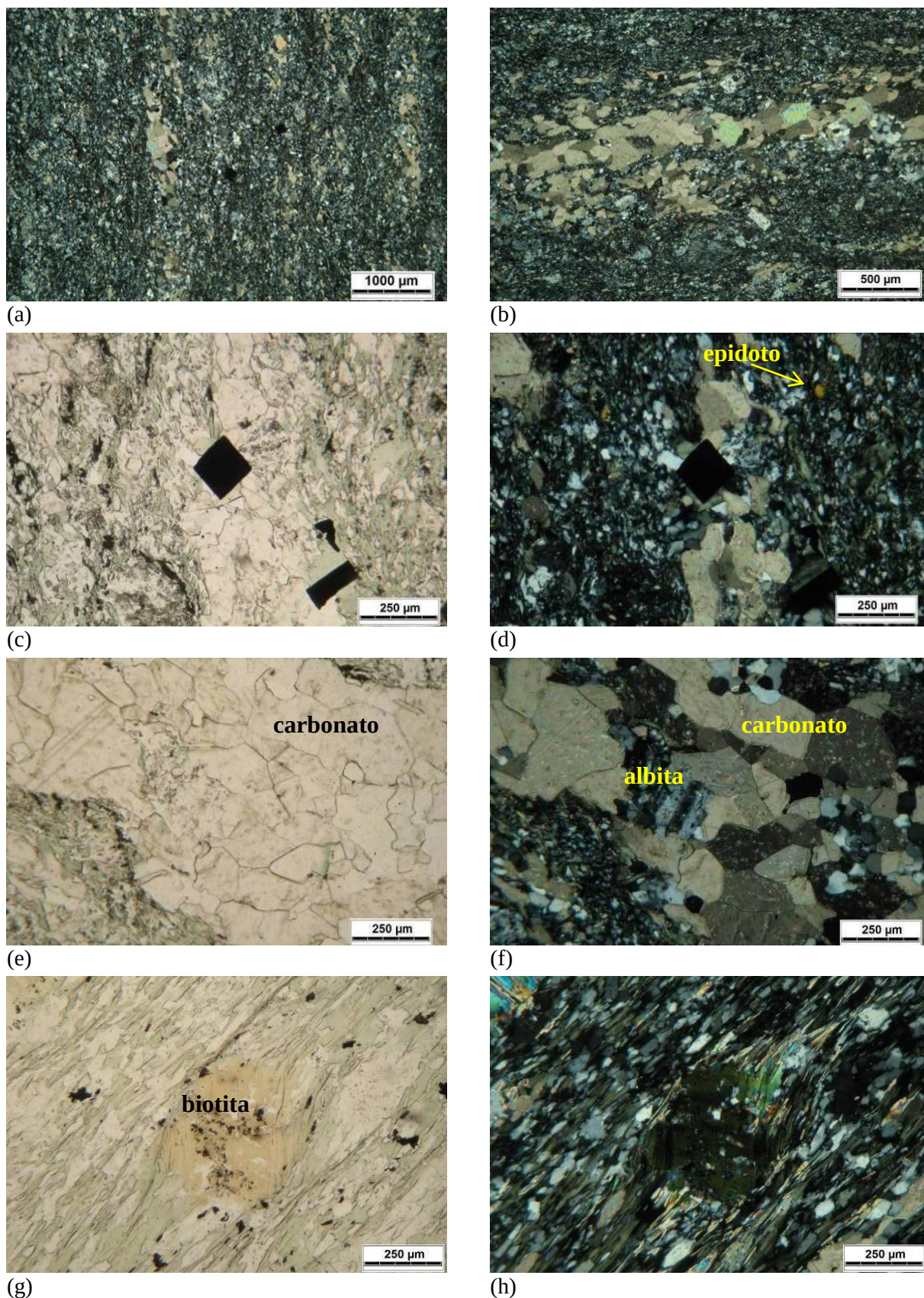


Figura 4.29 - Fotomicrografias do albita-carbonato-clorita-quartzo xisto, coletado próximo a Caeté-MG: (a) aspecto geral da rocha, nicóis descruzados; (b) presença de níveis carbonáticos, nicóis cruzados; (c) pirita com bordas de clorita, nicóis descruzados e (d) cruzados; (e) cristais de albita maclados, nicóis descruzados e (f) cruzados; (g) biotita, nicóis descruzados e (h) cruzados.

Parâmetros geométricos dos cristais:

A granulação da rocha é definida predominantemente pelos componentes quartzo e carbonato, que representam 40% a 50% da composição mineralógica. As medidas realizadas indicam que há uma variação do tamanho dos grãos de **quartzo** da ordem de 53%, com média de 33 μm e valores mínimo 9 μm e máximo de 141 μm . As medidas realizadas nos cristais de **carbonato** indicam que há uma variação do tamanho dos grãos da ordem de 58%, com média de 105 μm e valores mínimo de 12 μm e máximo de 409 μm . Os dados estatísticos descritivos mostram uma assimetria para a esquerda na distribuição dos tamanhos dos cristais de carbonato com predomínio de grãos menores (Tabela 4.6, Figura 4.31).

Entre os minerais que não são do grupo dos filossilicatos, os cristais de carbonato são os que se apresentam mais alongados, com razão de alongamento da ordem de 2,9, contra 2,4 para os cristais de quartzo e 2,2 para os cristais de plagioclásio.

Tabela 4.6 - Dados estatísticos descritivos para tamanho e razão de alongamento dos principais minerais.

Fase Mineral	Média μm	CoefVar %	Mínimo μm	Máximo μm	Assimetria	Taxa de alongamento
Quartzo	33	53	9	141	1,4	2,4
Carbonato	105	58	12	409	1,3	2,9
Clorita	57	43	12	161	1,1	8,1
Albita	55	41	12	150	1,0	2,2
Epidoto	17	-	10	20	-	-
Pirita	80	-	30	130	-	-

A seguir são mostrados os gráficos dos parâmetros geométricos para os cristais de carbonato, clorita, albita e quartzo. Um sumário gráfico na forma de um diagrama *boxplot* mostra a distribuição do tamanho dos cristais das fases minerais: a linha central da caixa corresponde à mediana, os traços verticais indicam os valores até 1,5 vezes a tendência central e os asteriscos (*) representam extremos (Figura 4.30.c). Quanto ao alongamento dos cristais, o gráfico de barras na Figura 4.30.d ilustra os percentuais de grãos alongados, sub-alongados e não alongados das principais fases minerais. O padrão de distribuição das orientações dos cristais no plano de foliação está representado em um histograma polar, na Figura 4.30.e.

Para cada fase mineral principal são apresentados o histograma com a distribuição dos tamanhos dos grãos e o histograma da razão de alongamento, calculada pela razão entre o comprimento do eixo maior pelo comprimento do eixo menor do cristal. (Figuras 4.31 a 4.34).

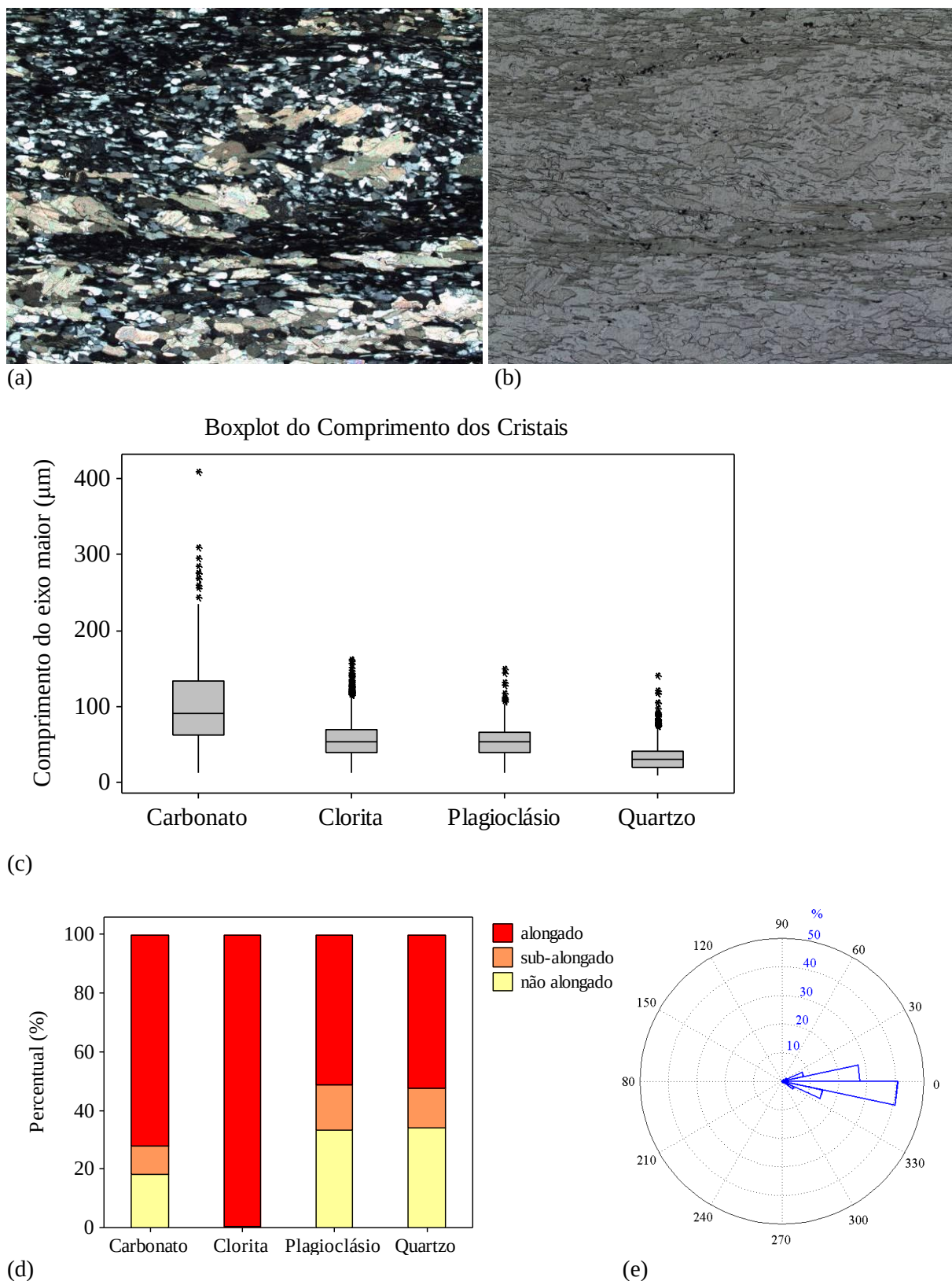
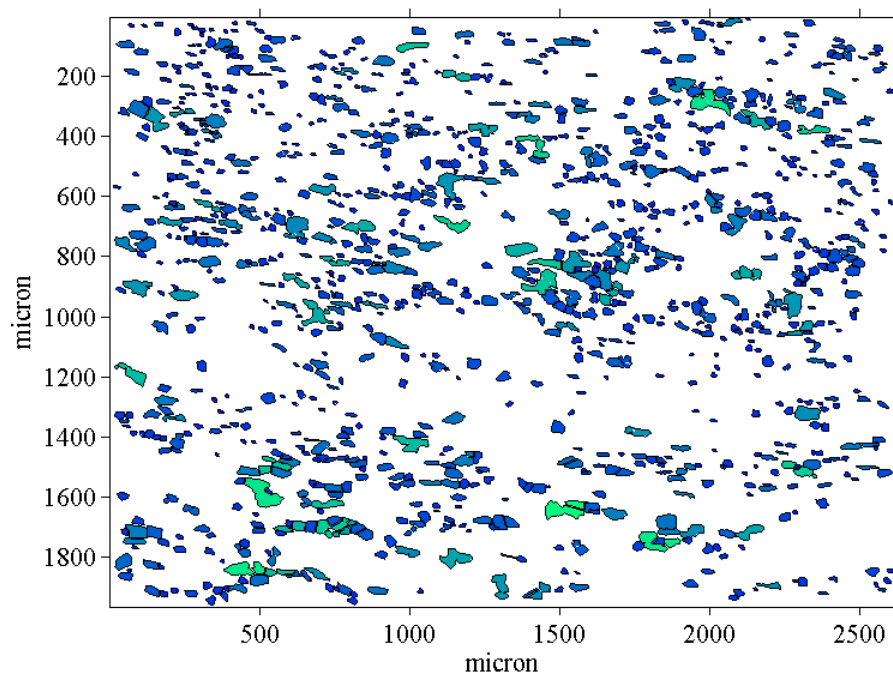
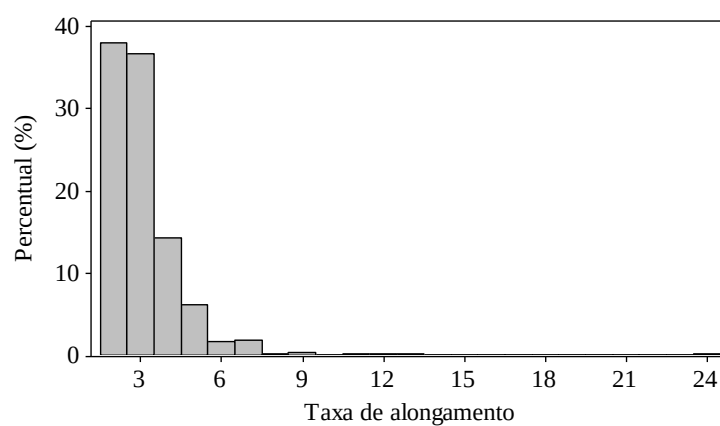


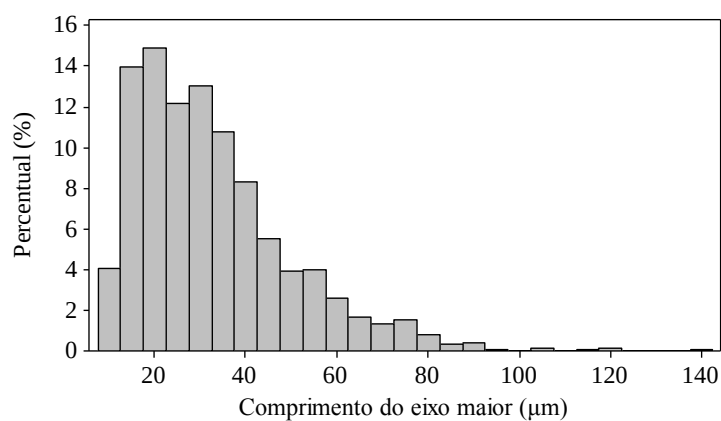
Figura 4.30 - Albita-carbonato-clorita-quartzo xisto, coletado próximo a Caeté-MG: (a) aspecto geral da rocha, 25x, nicóis cruzados e (b) descruzados; (c); sumário gráfico com distribuição central e mediana na caixa e valores anômalos representados por asteriscos (*); (d) gráfico de barras a 100% com minerais classificados quanto ao alongamento; (e) diagrama polar com orientação dos minerais no plano de foliação.



(a)

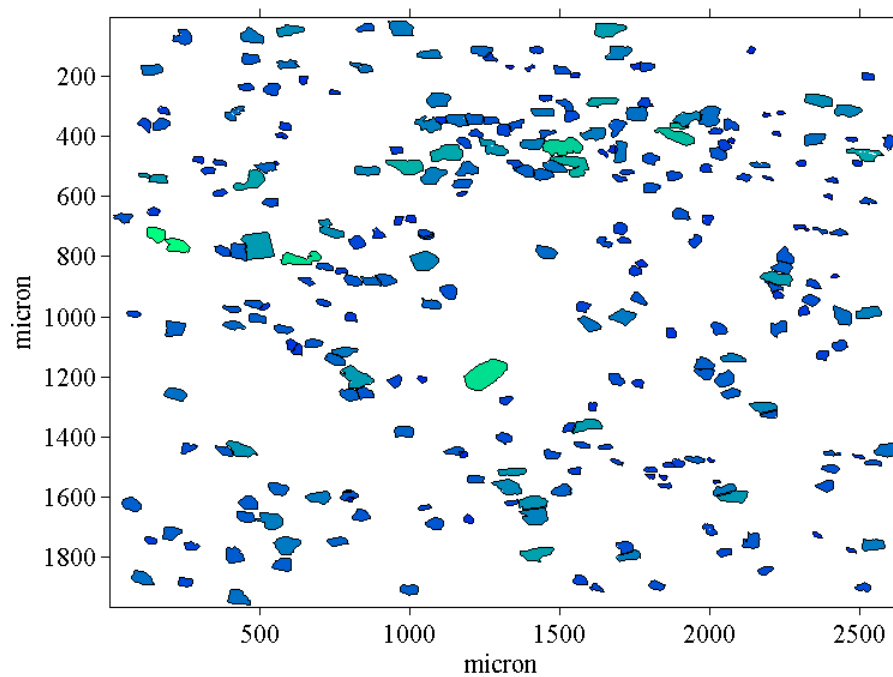


(b)

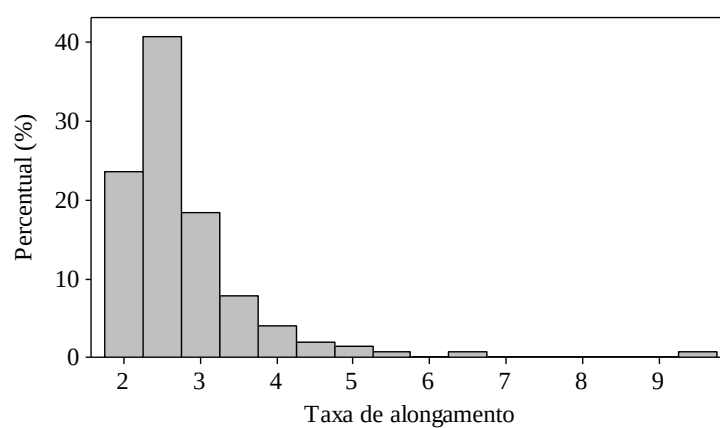


(c)

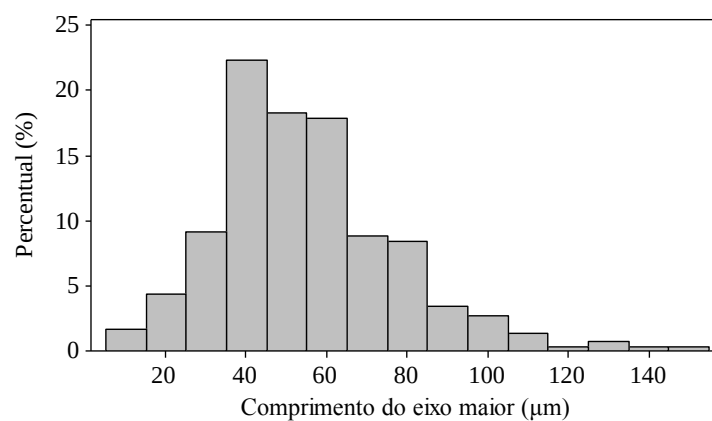
Figura 4.31 - Albita-carbonato-clorita-quartzo xisto: (a) imagem de cristais de quartzo individualizados; (b) histograma da razão de alongamento; (c) histograma do tamanho dos cristais.



(a)

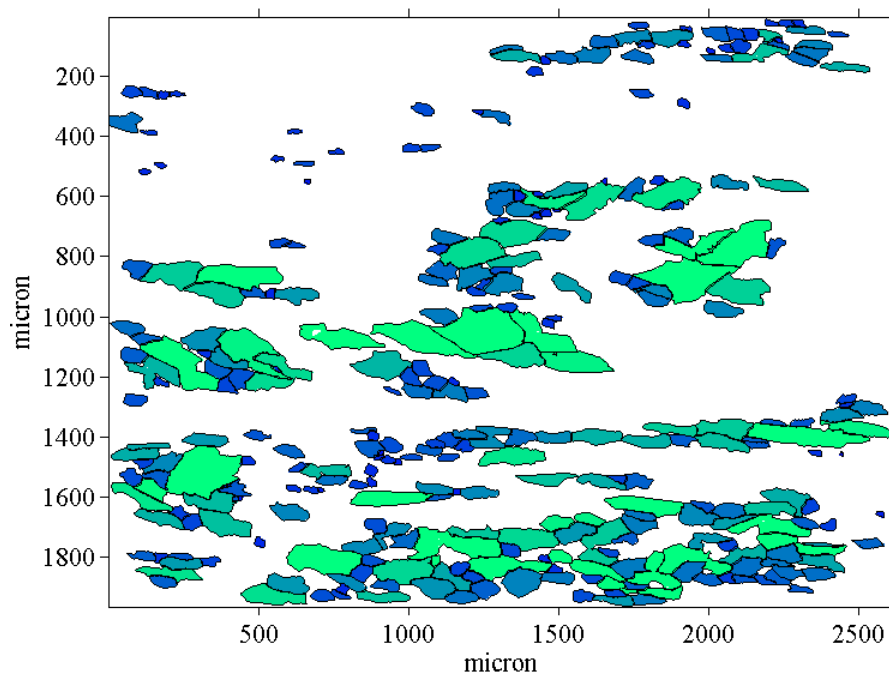


(b)

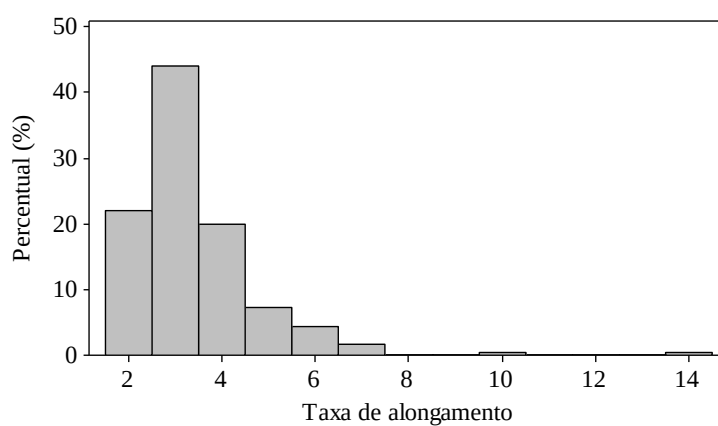


(c)

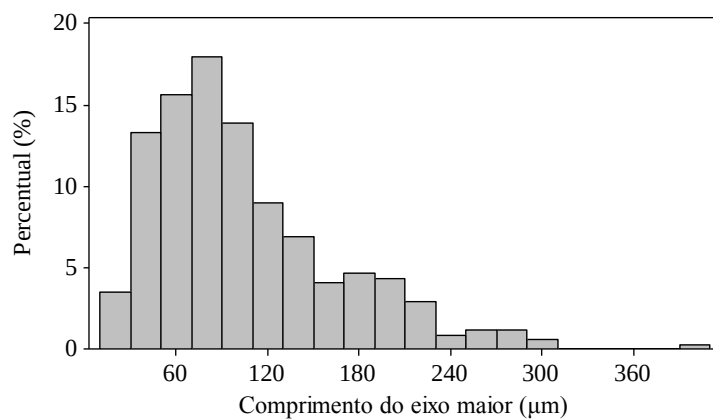
Figura 4.32 - Albita-carbonato-clorita-quartzo xisto: (a) imagem de cristais de albita individualizados; (b) histograma da razão de alongamento; (c) histograma do tamanho dos cristais.



(a)

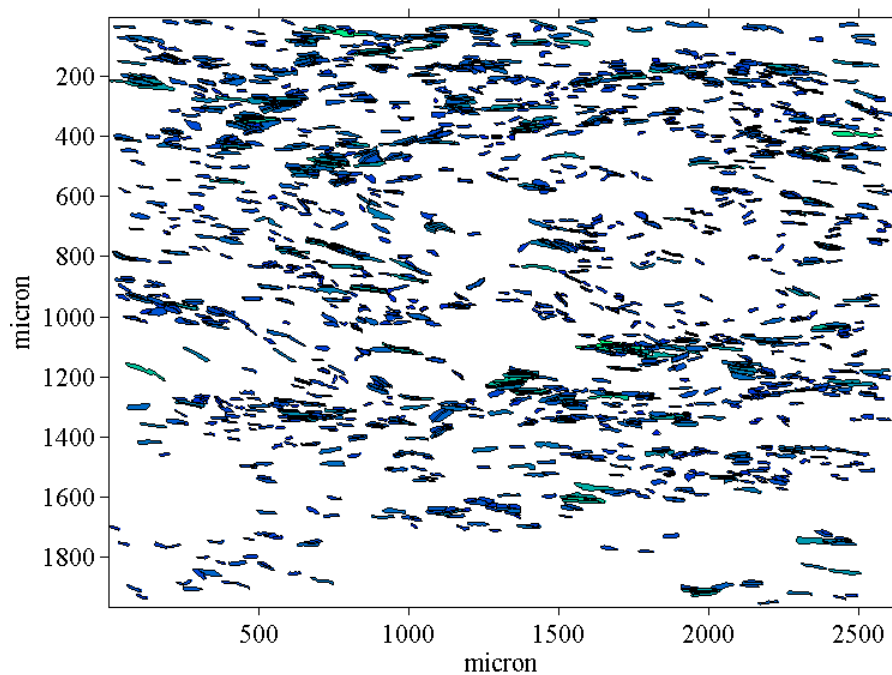


(b)

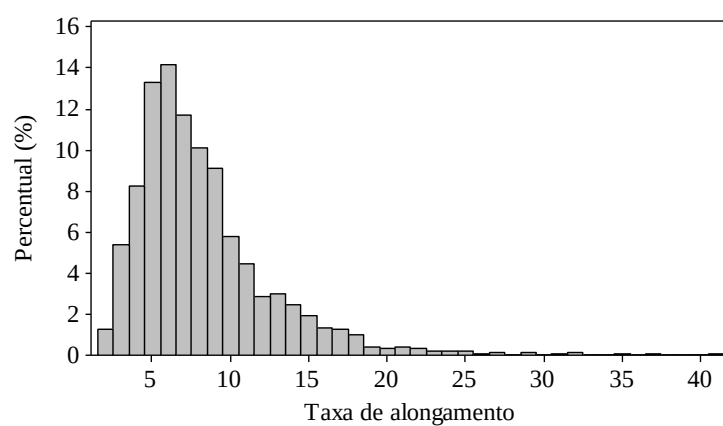


(c)

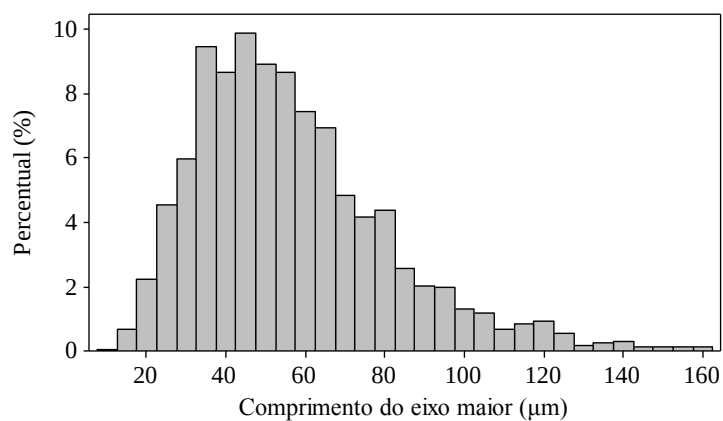
Figura 4.33 - Albita-carbonato-clorita-quartzo xisto: imagem de cristais de carbonato individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.34 - Albita-carbonato-clorita-quartzo xisto: imagem de cristais de clorita individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).

4.1.7 Xisto ultramáfico, Serro-MG

Como representante do grupo composicional do xisto ultramáfico, foi avaliado um cromita-clorita-carbonato-talco xisto da Sequência Serro, da Serra do Espinhaço Meridional, cujos resultados são apresentados a seguir.

O cromita-clorita-carbonato-talco xisto, cujas amostras foram coletados em pedreira a norte da cidade do Serro-MG, é uma rocha com granulação fina a média e textura lepidoblástica. Apresenta coloração cinza clara, por vezes azulada, quando seco e cinza quando úmido. Este litotipo é composto predominantemente por talco (40-50%), carbonato (30-40%), clorita (2-5%) e opacos (2-5%), estes últimos descritos por Zapparoli (2001) como cromita. A presença do talco torna a rocha untuosa ao tato.

Apresenta como aspecto macroscópico característico uma estruturação marcada por bandas carbonáticas mais claras, descontínuas e com espessura variável (Figura 4.35). A rocha não apresenta fissilidade marcante.



Figura 4.35 - Cromita-clorita-carbonato-talco xisto: aspecto macroscópico da rocha. Fotografia capturada em banco da Praça João Pinheiro, logradouro central na cidade de Serro-MG.

Carbonatos ocorrem na forma de cristais alongados, com clivagens características, podendo conter inclusões de cromita e talco. Apresentam microfissuras intragranulares e comumente estão manchados, podendo ser observadas ao microscópio películas de hidróxidos ou óxidos de ferro, que conferem aspecto sujo aos cristais. Em determinações realizadas por difratometria de raios X e EDS, Zapparoli (2001) identificou os carbonatos magnesita, ankerita, siderita e ferrodolomita. Determinações realizadas por difração por raios X, para a presente tese, confirmaram a presença de Fe-magnesita e dolomita.

O **talco** ocorre preferencialmente na forma de finas lamelas e agregados fibrosos orientados, que definem a foliação da rocha (Figura 4.36.c-d).

A **cromita** ocorre disseminada por toda a rocha, comumente associada ao talco. Apresenta-se tanto em massas anédricas, como na forma de cristais subédricos a euédricos, com grande variedade de tamanho (Figura 4.36.a-b e 4.36.e-f).

Clorita ocorre em menor quantidade, em palhetas finas intercrescidas ao talco, com coloração verde claro e leve pleocroísmo. Comumente associada às bordas das cromitas.

Zapparoli (2001) descreve o metamorfismo que atingiu esse xisto ultramáfico como do tipo regional em condições de fácies anfibolito (Miyashiro, 1973; Yardley, 1989), seguido de retrometamorfismo para fácies xisto verde, com associação mineral indicativa de pressões entre 2 e 4,5 kbar e temperaturas entre 350°C e 500°C. Zapparoli (2001) atribui a formação do talco e do carbonato a um processo de alteração hidrotermal pervasivo, concomitante ao metamorfismo e responsável pela maior parte dos minerais presentes na rocha. A disposição dos cristais de talco e carbonato, concordantemente com a foliação e na forma de veios e bolsões, reforça a hipótese de processo hidrotermal por fluidos ricos em CO₂, com temperaturas entre 350°C e 450°C e pressão entre 3 e 5 kbar.

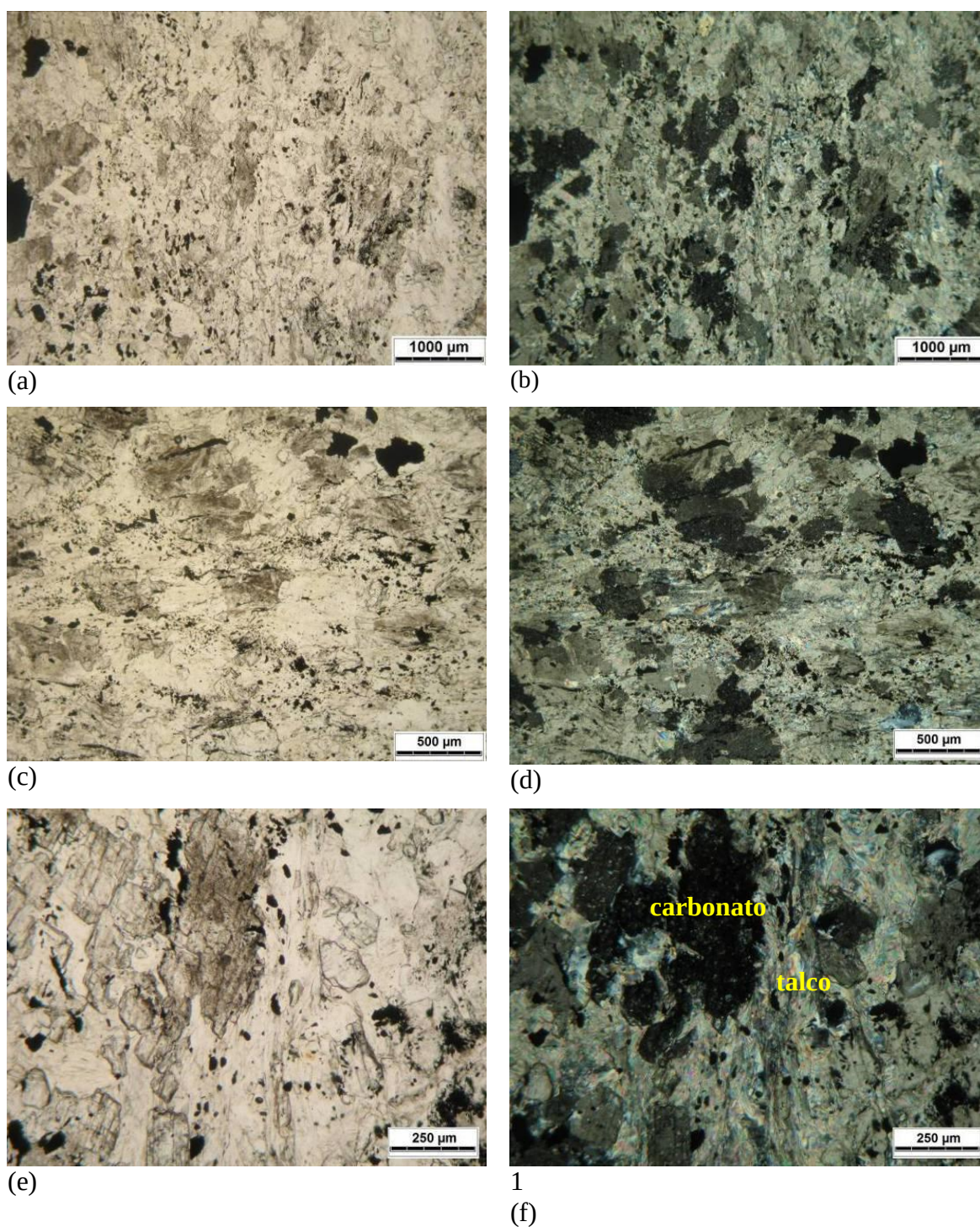


Figura 4.36 - Fotomicrografias do cromita-clorita-carbonato-talco xisto, coletado próximo a Serro-MG: (a) aspecto geral da rocha, nicóis descruzados e (b) cruzados; (c) orientação das fibras de talco interligando os cristais de carbonato, nicóis descruzados e (d) cruzados; (e) carbonatos e minerais opacos associados ao talco, nicóis descruzados e (f) cruzados.

Parâmetros geométricos dos cristais:

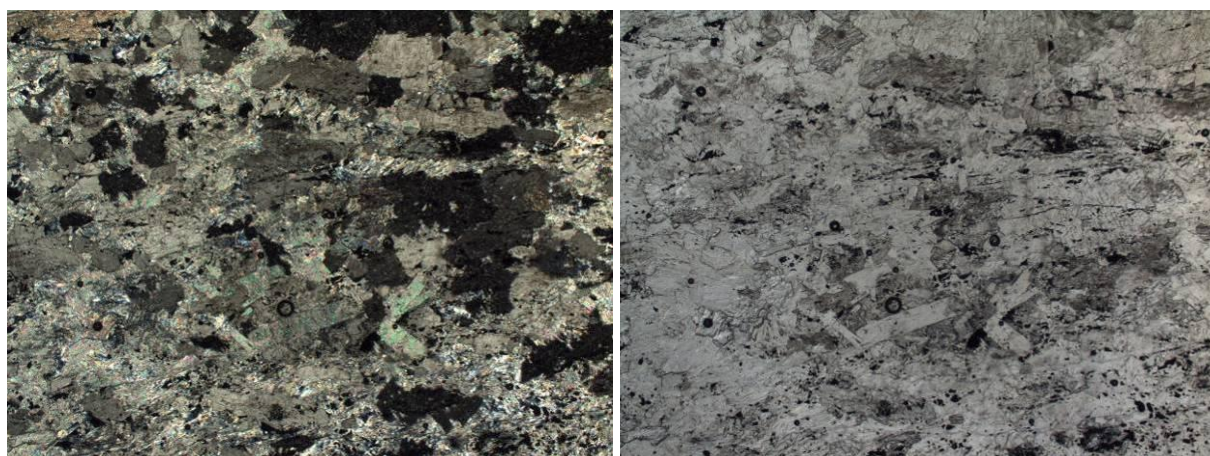
A granulação da rocha é definida por seus principais componentes, que são o carbonato e o talco. As medidas realizadas indicam que há uma variação do tamanho dos grãos de **carbonato** da ordem de 60%, com média de 381 μm e valor mínimo de 80 μm e máximo de 1093 μm . Os dados estatísticos descritivos mostram uma assimetria para a esquerda na distribuição dos tamanhos dos cristais de carbonato, indicando um predomínio de grãos menores (Tabela 4.7 e Histograma na Figura 4.37.c.). Para o **talco** o valor médio é de 332 μm , com mínimo de 65 μm e máximo de 1493 μm . Neste caso, é preciso considerar o *habitus* do talco, que ocorre entre os grãos de carbonato formando agregados, com raras palhetas bem formadas. A **clorita** foi observada em raros cristais na forma de palhetas, com tamanho médio de 216 μm .

Tabela 4.7 - Cromita-clorita-carbonato-talco xisto: dados estatísticos descritivos para tamanho e razão de alongamento dos principais minerais.

Fase Mineral	Média μm	CoefVar %	Mínimo μm	Máximo μm	Assimetria	Taxa de alongamento
Carbonato	381	60	80	1093	1,0	2,2
Talco	332	65	65	1493	2,3	2,9
Clorita	216	32	110	345	0,4	3,6

A seguir estão representados os resultados dos cálculos dos parâmetros geométricos dos principais minerais constituintes do xisto. Um sumário gráfico mostra a distribuição do tamanho dos cristais: a linha central da caixa corresponde à mediana, os traços verticais indicam os valores até 1,5 vezes a tendência central e os asteriscos (*) representam extremos (Figura 4.37.c). O gráfico de barras na Figura 4.37.d ilustra os percentuais de grãos alongados, sub-alongados e não alongados das principais fases minerais. O padrão de distribuição das orientações dos cristais de carbonato, clorita e talco, no plano de foliação está representado em um histograma polar, na Figura 4.37.e.

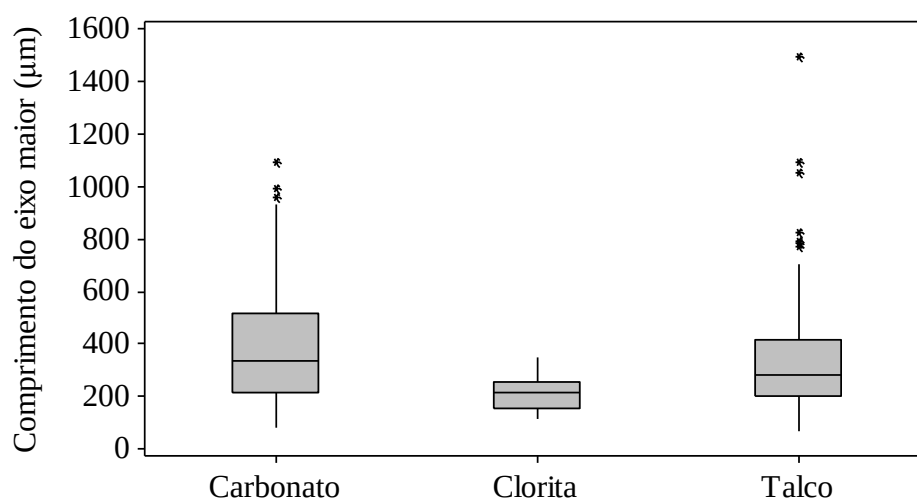
Na sequência, para os cristais de carbonato e talco são apresentados um histograma com o padrão de distribuição dos tamanhos dos grãos e um histograma da razão de alongamento, calculada pela razão entre o comprimento do eixo maior pelo comprimento do eixo menor do cristal (Figuras 4.38 e 4.39). A clorita não foi representada em gráficos individuais, porque ocorre em quantidade pouco representativa, em termos texturais, na rocha.



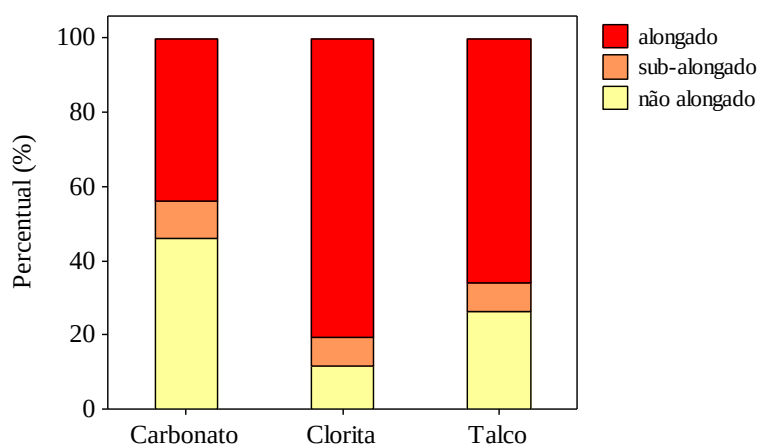
(a)

(b)

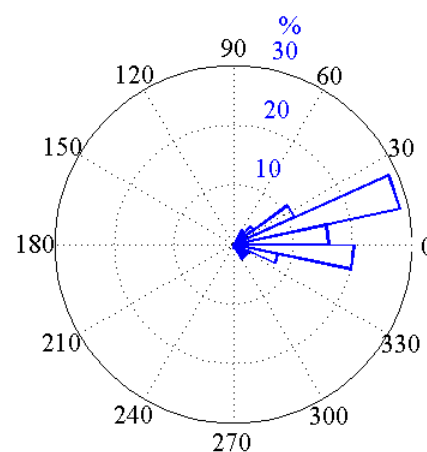
Boxplot do Comprimento dos Cristais



(c)

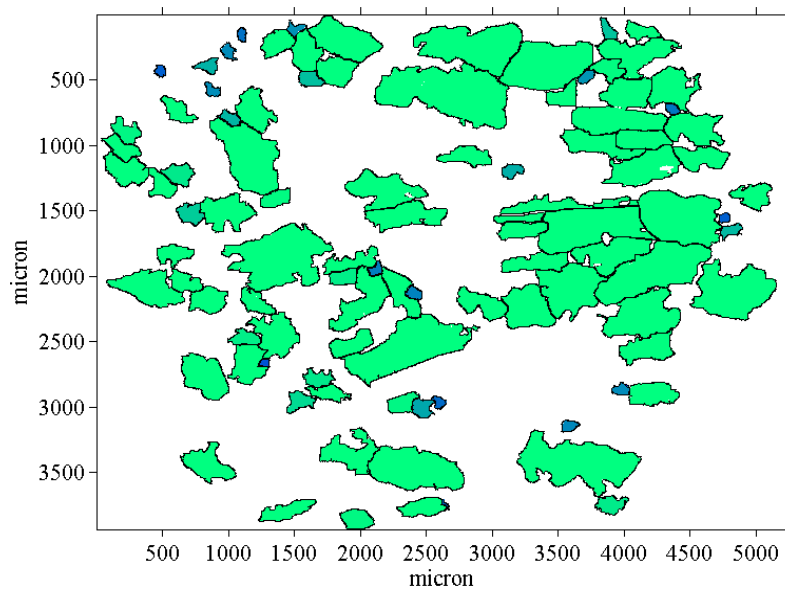


(d)

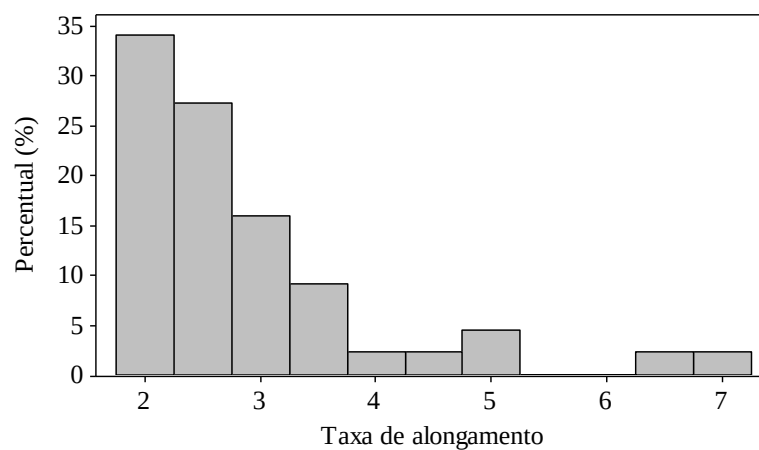


(e)

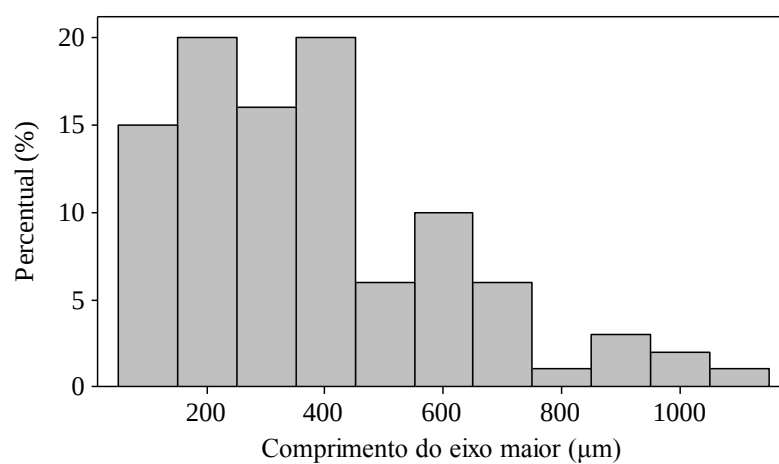
Figura 4.37 - Cromita-clorita-carbonato-talco xisto, coletado próximo a Serro-MG: (a) aspecto geral da rocha, 25x, nicóis cruzados e (b) descruzados; (c) sumário gráfico com a distribuição central e mediana na caixa e valores anômalos representados por asteriscos (*); (d) gráfico de barras a 100% com minerais classificados quanto ao alongamento; (e) diagrama polar com orientação dos minerais no plano de foliação.



(a)

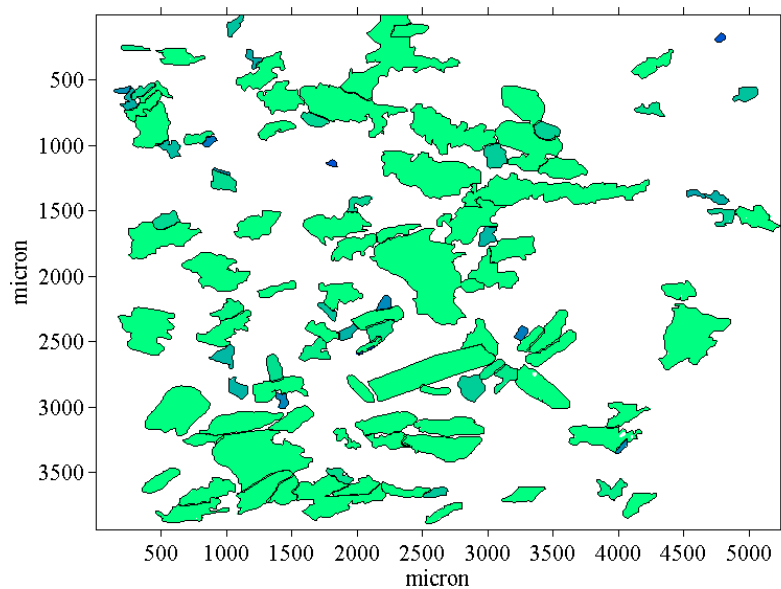


(b)

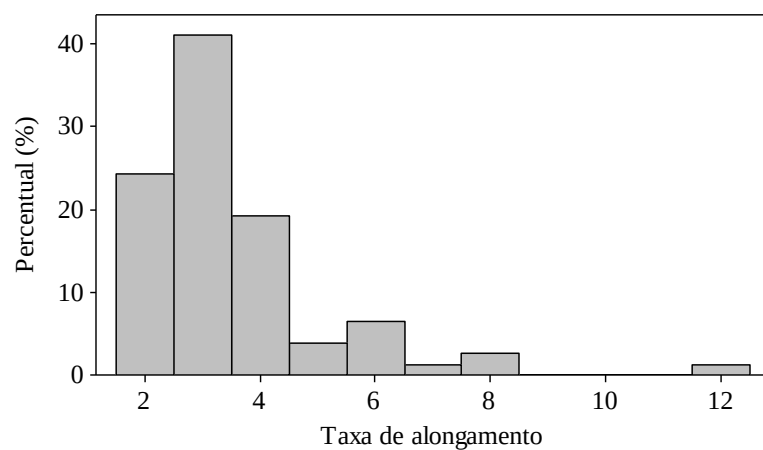


(c)

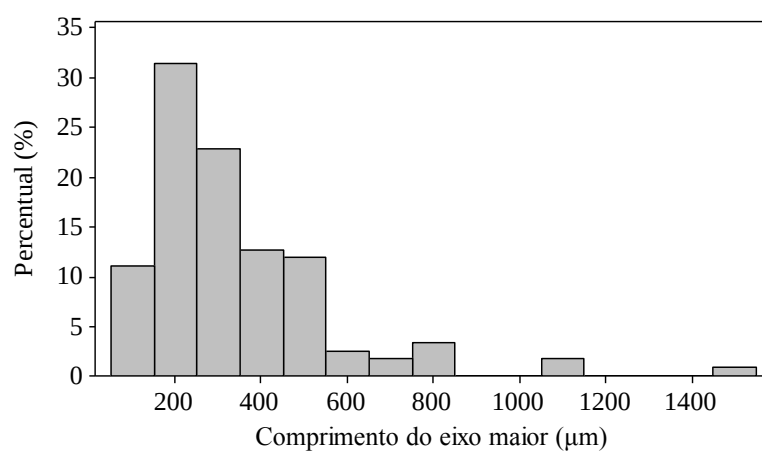
Figura 4.38 - Cromita-clorita-carbonato-talco xisto: imagem de cristais de carbonato individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.39 - Cromita-clorita-carbonato-talco xisto: imagem de cristais de talco individualizados (a), histograma da razão de alongamento (b); histograma do tamanho dos cristais (c).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DE ROCHAS E IDENTIFICAÇÃO DE FASES MINERAIS - RESULTADOS DE ANÁLISES

4.2.1 Caracterização via análise química de rocha total

Os litotipos que compõem este estudo foram submetidos a análises químicas de rocha total, conforme os métodos analíticos apresentados no Capítulo 2 - Materiais e métodos. Em todas as rochas, os resultados das análises dos elementos Ag, Th, Be, Bi, Cd, Mo, Sb, Se, Sn, Tl, U e W estavam abaixo do limite de detecção do método analítico utilizado (ICP) e por isso não foram incluídos na tabela geral. A apresentação dos resultados das análises na tabela seguiu uma ordem pelo critério de grau de semelhança de composição química e de sua filiação. Assim inicialmente foi apresentado o grupo das rochas peraluminosas, seguido pelos xistos metavulcânicos máficos e os xistos de composição ultramáfica (Tabela 4.8). Os resultados das análises químicas de rocha total mostraram-se coerentes com as composições mineralógicas encontradas na descrição petrográfica, apresentadas no Capítulo 4, item 4.1.

O grupo das rochas peraluminosas apresentou de forma geral composições muito próximas, com teores elevados de Al_2O_3 , valor médio de 17,6% e limites entre 15,9%, encontrado no folhelho, coletado nas proximidades da cidade de Paraopeba, e teor máximo de 20,1%, encontrado no granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de Sabará. Os resultados da análise de SiO_2 mostraram uma baixa variação, com teor médio de 62%, valor mínimo de 59,6% e valor máximo igual a 63,2%. Com base nos resultados das análises, podemos afirmar que as ardósias e xistos peraluminosos são metassedimentos com caráter essencialmente potássico, onde a relação entre Na_2O e K_2O não ultrapassa 0,65, sendo que os valores mais altos foram encontrados para as ardósias ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ igual a 0,65). O granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, coletado próximo à localidade de Passagem de Mariana, difere, no conjunto de rochas peraluminosas, por apresentar a menor razão $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$, o valor mais baixo de CaO e a maior razão $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ (Tabela 4.8).

O xisto máfico e o xisto ultramáfico apresentaram naturalmente os maiores valores para $\text{MgO}+\text{FeO}$ e $\text{CaO}+\text{MgO}$, com valores de $\text{MgO}+\text{FeO}$ de 14,48% e 37,44% e de $\text{CaO}+\text{MgO}$ de 13,65% e 35,19%, respectivamente. A amostra analisada do albita-carbonato-clorita-quartzo xisto, coletada entre as cidades de **Caeté e Sabará**, foi a que apresentou o valor mais alto de CaO : 7,37% para uma média das outras rochas de 0,48%. Este valor é coerente com a zona de alteração com processo de carbonatação, onde a rocha foi coletada e, em termos gerais, as análises mostraram-se semelhantes a valores que constam na literatura

para rochas metavulcânicas da região (Ribeiro-Rodrigues, 1998; Lobato *et al.*, 2007).

Tabela 4.8 - Resultados de análises químicas de rocha total dos materiais estudados.

			Rochas peraluminosas					Xisto verde	Xisto Ultramáfico
			Paraopeba	Sabará	P. Mariana	Araçuaí	Itinga	Caeté	Serro
Fluorescência de raios X	SiO ₂	%	63,2	59,6	61,7	61,8	63,5	47,2	33,2
	TiO ₂	%	0,90	0,73	0,88	0,92	0,88	1,25	0,06
	Al ₂ O ₃	%	15,9	20,1	16,7	17,9	17,4	14,3	1,54
	Fe ₂ O ₃	%	6,79	9,43	12,30	7,93	7,73	11,70	6,93
	MnO	%	0,10	0,16	0,20	0,11	0,11	0,16	0,11
	MgO	%	3,02	2,52	2,49	3,25	3,19	6,28	35,1
	CaO	%	0,77	0,58	0,15	0,64	0,69	7,37	0,09
	P ₂ O ₅	%	0,238	0,125	0,09	0,178	0,171	0,147	0,012
	Na ₂ O	%	2,2	1,12	0,54	2,03	2,01	2,82	<0,1
	K ₂ O	%	3,41	3,41	2,55	3,73	3,62	0,22	<0,01
ICP	LOI	%	3,35	3,24	2,78	2,44	1,43	8,88	22,08
	Fech. Estequi.	%	99,88	101,02	100,38	100,93	100,73	100,33	99,12
	Na ₂ O/K ₂ O		0,65	0,33	0,21	0,54	0,56	12,82	-
	Al ₂ O ₃ /Na ₂ O		7,23	17,95	30,93	8,82	8,66	5,07	-
	FeO	%	4,94	4,72	1,78	5,69	6,13	8,2	2,34
	Al	%	7,46	8,75	6,91	7,95	8,28	7,16	0,75
	As	ppm	18	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	Ba	ppm	414	693	694	536	520	91	46
	Ca	%	0,52	0,38	0,11	0,42	0,47	4,78	0,08
	Co	ppm	13	21	25	19	19	35	88
	Cr	ppm	47	95	118	66	64	67	1826
	Cu	ppm	20	10	<3	57	43	36	3
	Fe	%	4,15	5,55	6,45	4,71	4,73	7,24	3,98
	K	%	1,85	1,62	2,01	1,88	1,85	0,18	0,02
	La	ppm	23	24	27	25	25	<20	<20
	Li	ppm	58	77	43	60	61	44	<3
	Mg	%	1,72	1,39	1,42	1,83	1,85	3,53	>15
	Mn	%	0,07	0,12	0,15	0,08	0,08	0,11	0,08
	Na	%	1,42	0,68	0,3	1,26	1,27	1,89	<0,01
	Ni	ppm	35	84	98	46	48	71	1734
	P	%	0,09	0,05	0,04	0,06	0,07	0,05	<0,01
Leco	Pb	ppm	<8	21	14	16	16	<8	<8
	Sc	ppm	15	19	19	17	17	35	<5
	Sr	ppm	114	119	53	65	82	108	4
	Ti	%	0,51	0,38	0,32	0,53	0,52	0,58	0,02
	V	ppm	101	123	118	137	131	247	45
	Y	ppm	24	22	23	12	8	13	<3
	Zn	ppm	78	39	90	90	113	72	61
	Zr	ppm	125	104	92	117	80	63	<3
	C	%	0,17	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	S	%	0,01	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

De modo a favorecer a comparação entre as análises, na Tabela 4.9 foram compilados os valores encontrados para as cinco rochas pelíticas estudadas, teores médios mundiais (Shaw, 1956 in: Miyashiro, 1973) e teores para ardósia cinza. Os resultados encontrados para os xistos pelíticos neste trabalho são semelhantes à média mundial, principalmente para os maiores componentes destas rochas: SiO₂, TiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃. Os teores de CaO para os cinco metapelitos analisados são mais baixos que a média mundial obtida por Shaw (1956 in: Miyashiro, 1973), com valores entre 0,15% e 0,77%, contra uma média mundial de 1,24%. O grau de oxidação das amostras foi calculado pela fórmula $\{Fe_2O_3 (Total) - (FeO \times 1,1)\} / Fe_2O_3 (Total)$, onde o valor igual a 1 indica 100% de oxidação (Lobato *et al.*, 2001). O valor mais alto, que indica maior oxidação, foi calculado para o granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, coletado próximo à localidade de Passagem de Mariana, que entre as rochas do conjunto, é o mais intemperizado.

Tabela 4.9 - Resultados de análises das rochas pelíticas estudadas e valor médio mundial.

		Folhelho		Xistos peraluminosos			média mundial *	Ardósia cinza Província das Ardósias**
		Paraopeba	Sabará	P. Mariana	Araçuaí	Itinga		
Fluorescência de raios X	SiO ₂	%	63,2	59,6	61,7	61,8	63,5	63,51
	TiO ₂	%	0,9	0,73	0,88	0,92	0,88	0,79
	Al ₂ O ₃	%	15,9	20,1	16,7	17,9	17,4	17,35
	Fe ₂ O ₃	%	6,79	9,43	12,3	7,93	7,73	6,71
	MnO	%	0,10	0,16	0,20	0,11	0,11	-
	MgO	%	3,02	2,52	2,49	3,25	3,19	2,31
	CaO	%	0,77	0,58	0,15	0,64	0,69	1,24
	P ₂ O ₅	%	0,238	0,125	0,09	0,178	0,171	-
	Na ₂ O	%	2,2	1,12	0,54	2,03	2,01	1,96
	K ₂ O	%	3,41	3,41	2,55	3,73	3,62	3,35
	LOI	%	3,35	3,24	2,78	2,44	1,43	2,64
	C	%	0,17	-	-	-	-	-
	Fech. Esteq.	%	100,05	101,02	100,38	100,93	100,73	99,86
	Na ₂ O/K ₂ O		0,65	0,33	0,21	0,54	0,56	0,59
	Al ₂ O ₃ /Na ₂ O		7,23	17,95	30,93	8,82	8,66	8,85
	Fe total vs FeO***		0,19	0,44	0,84	0,20	0,12	-
								0,21

* Shaw (1956 in: Miyashiro, 1973).

** Valores médios para ardósias cinza (Grossi *et al.*, 1998).

*** $\{Fe_2O_3 (Total) - (FeO \times 1,1)\} / Fe_2O_3 (Total)$

Para a amostra de folhelho, coletada nas proximidades da cidade de Paraopeba, as análises revelaram que a variedade estudada não contém enxofre ou carbono representativos (Tabela 4.9). Petrograficamente foi identificado o mineral apatita e na leitura realizada no detector de raios X por espectroscopia por energia dispersiva (EDS-MEV) foi detectada a presença de elementos terras raras nesse mineral. A presença deste mineral é coerente com os valores mais elevados de P₂O₅ na análise química de rocha total. Os altos teores de MgO e

FeO são coerentes com sua matriz clorítica. A comparação dos resultados da amostra de folhelho estudada, com os valores médios para as ardósias cinza da Província das Ardósias, apresentados por Grossi *et al.* (1998), mostra que os valores em geral são semelhantes. Apenas os teores de P_2O_5 e Na_2O são mais altos no folhelho e esta diferença se reflete na razão Na_2O/K_2O , com valores de 0.65%, contra 0.46% para a média das ardósias cinza da Província.

As análises químicas para a amostra de cromita-clorita-carbonato-talco xisto, coletada próximo a **Serro**, mostraram os resultados coerentes com sua filiação ultramáfica, com composição muito distinta em relação às outras rochas. O teor de SiO_2 inferior a 45% (33,2%) confirma sua composição ultrabásica. O teor elevado de MgO (35%), em comparação ao teor de CaO (0.09%) confirma a composição magnesiana do mineral de carbonato e do conteúdo elevado de talco. O conteúdo de Cr - 1826 ppm para uma média dos outros litotipos de 77 ppm - corresponde à presença de cromitas.

4.2.2 Identificação de fases minerais por difração de raios X

Foram realizadas análises de difração por raios X para identificação dos minerais carbonáticos das bandas claras do cromita-clorita-carbonato-talco xisto, coletado nas proximidades da cidade de Serro. Os resultados confirmaram o mineral predominante como a Fe-magnesita, $(Mg,Fe)CO_3$ e subordinadamente a dolomita $CaMg(CO_3)_2$, conforme ilustrado no gráfico de difração de raios X, com os picos das fases minerais presentes (Figura 4.40).

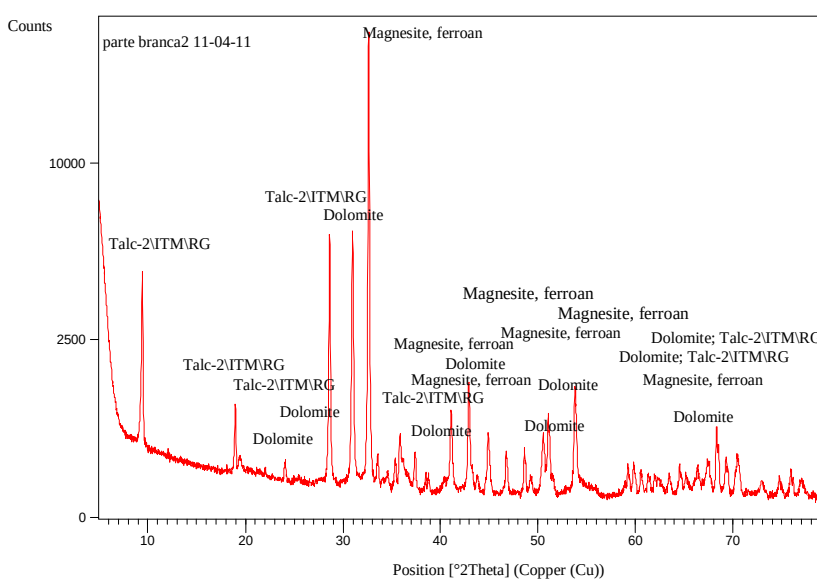


Figura 4.40 - Gráfico do difratômetro de raios X, com os picos das fases minerais presentes nas porções claras do cromita-clorita-carbonato-talco xisto, amostra coletada próximo a Serro-MG.

4.3 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Com o objetivo de caracterizar as rochas foliadas segundo suas propriedades tecnológicas, as amostras dos sete litotipos selecionados para este estudo foram submetidas a ensaios para a determinação das propriedades físicas e mecânicas, obedecendo aos procedimentos normativos definidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas- ABNT. No Laboratório de Rochas Ornamentais–LABTECRochas do Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa-CPMTC, Instituto de Geociências - UFMG, foram realizados ensaios para determinação de índices físicos, determinação da resistência à abrasão (desgaste abrasivo Amsler), determinação da dilatação térmica linear, determinação da resistência à compressão uniaxial e determinação da resistência à flexão por carregamento em três pontos – módulo de ruptura.

4.3.1 Índices físicos

Os índices físicos correspondem às propriedades de densidade aparente, porosidade aparente e absorção d'água. A porosidade e a absorção d'água são características que afetam diretamente a resistência mecânica e a alterabilidade das rochas. A presença de vazios pode reduzir a integridade da rocha e uma pequena alteração no volume de poros pode produzir efeito mecânico indesejável (ISRM, 1981 in: Tuğrul & Zarif, 1999; Onodera & Asoka, 1980). Os ensaios para obtenção de índices físicos foram realizados conforme procedimentos descritos na norma NBR 15845 Anexo B (ABNT, 2010) e apresentados no Capítulo 2 – Materiais e métodos.

Os resultados obtidos revelaram que os valores de densidade aparente para as amostras de rochas peraluminosas apresentam pouca variação, com valores entre 2611 kg/m³ e 2829 kg/m³ e média de 2742 kg/m³. Já a porosidade aparente e a absorção d'água apresentaram variações maiores, com valores de porosidade aparente entre 0.25% e 1.16% e absorção d'água com valores entre 0.09 e 0.44%. A Tabela 4.10 contém os resultados.

Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de índices físicos e parâmetros geométricos dos cristais de quartzo (tamanho e coeficiente de variação).

	Índices Físicos			Tamanho dos cristais de quartzo	
	Densidade aparente kg/m ³	Porosidade aparente %	Absorção d'água %	Média µm	Coeficiente de variação %
Folhelho e xistos peraluminosos					
Paraopeba	2718	0,61	0,22	4	47%
Sabará	2829	0,48	0,17	29	79%
P. de Mariana	2611	1,16	0,44	30	56%
Araçuaí	2793	0,25	0,09	34	55%
Itinga	2761	0,84	0,30	80	51%
Média	2742	0,67	0,25	35	58%
Xisto verde e xisto ultramáfico					
Caeté	2754	0,75	0,27	50*	84%
Serro	2936	0,79	0,27	381**	60%

* Quartzo, albita e carbonato ** Carbonato

O estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de **Araçuaí**, apresenta o valor mais baixo de porosidade aparente e absorção d'água. É uma rocha com granulação muito fina e com bom entrelaçamento entre os cristais, com predomínio de contatos intergrãos curvos. O granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de **Sabará**, é o segundo litotipo com menor valor de porosidade aparente e, da mesma forma que a rocha anterior, nele predominam os contatos intergrãos curvos e interlobados. Os dois litotipos têm em comum populações de grãos de quartzo menores constituintes da matriz, com valores médios de 23 µm e 22 µm, e grãos maiores em níveis mais quartzosos, com valores de 78 µm e 51 µm. O folhelho, coletado próximo à cidade de **Paraopeba**, apesar de possuir grãos muito menores (tamanho médio de 4 µm), têm valor ligeiramente mais alto de porosidade aparente e absorção d'água, 0,61% e 0,22% respectivamente (Tabela 4.10). Os resultados dos índices físicos encontrados para o folhelho são próximos daqueles dos ensaios realizados para as ardósias cinza, pelo IPT para o Catálogo de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS/CETEM, 2002), a saber: densidade aparente de 2744 kg/m³, porosidade de 0,52% e absorção d'água de 0,19%.

O granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, com amostras coletadas próximo à localidade de **Passagem de Mariana**, tem o maior valor para porosidade aparente e para

absorção d'água. Este xisto tem o tamanho médio dos grãos (30 μm) e a composição química semelhante ao estaurolita xisto, com amostras coletadas próximo à cidade de **Sabará** (Tabela 4.10), sendo que ambos os litotipos são rochas na mesma unidade estratigráfica - o Grupo Sabará, sequência no topo do Supergrupo Minas. Esta diferença reflete um grau de alteração maior das amostras coletadas na região de Passagem de Mariana, característica que as distinguem em relação aos demais materiais estudados, que são todas rochas sãs.

Do grupo das rochas peraluminosas, excluindo-se as amostras de xisto coletadas próximo a Passagem de Mariana, o cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de **Itinga** é o que apresenta a maior porosidade aparente e absorção d'água (Tabela 4.10). Além de esta rocha possuir os maiores tamanhos de cristais entre as peraluminosas, nela predominam os contatos retos entre grãos, que favorecem a percolação de água.

O albita-carbonato-clorita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de **Caeté**, apresenta porosidade aparente de 0.75% e absorção d'água de 0.27%, valores próximos àqueles do xisto peraluminoso, coletado próximo à cidade de Itinga. Entre as fases minerais quartzo e albita, presentes nesse xisto máfico, os cristais têm tamanhos próximos às médias dos xistos peraluminosos. Já os carbonatos, que representam de 15 a 20% da composição da rocha, o tamanho médio dos cristais é de 105 μm , com predomínio de contatos retos entre grãos.

O xisto ultramáfico, coletado próximo à cidade de **Serro**, apresenta valores para porosidade aparente de 0.79% e absorção d'água de 0.27%, em concordância com uma presença de cristais de carbonato com tamanhos maiores e frequentemente fraturados. Este xisto apresenta os maiores valores para densidade aparente, que refletem sua composição ferro-magnésiana e cromitífera.

Para os tipos estudados, a absorção d'água apresenta uma correlação direta com a porosidade aparente, com um coeficiente de correlação de 99.4%. (Figura 4.41). Mas não podemos afirmar, com base nestas amostras somente, que esta relação se mantém para todos os tipos de rochas, visto que há aspectos sobre a comunicação entre os poros e o tamanho deles, que influenciam a absorção.

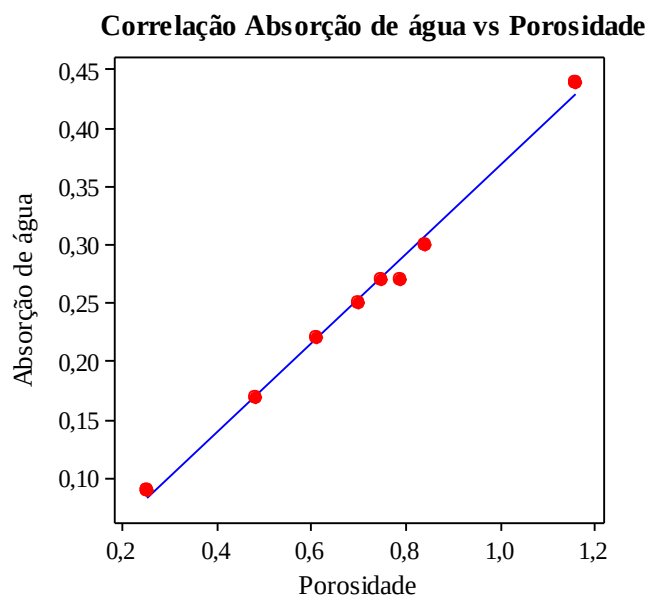


Figura 4.41 - Gráfico de correlação entre porosidade aparente e absorção d'água para as rochas foliadas estudadas.

4.3.2 Avaliação do desgaste por abrasão

Os ensaios de resistência ao desgaste por abrasão foram executados segundo procedimentos definidos pela ABNT e descritos do Capítulo 2- Materiais e Métodos. Eles foram realizados no LABTECRochas, no CPMTC, Instituto de Geociências da UFMG, com equipamento de fabricação pela empresa CONTENCO (Figura 4.42).



Figura 4.42 - Máquina para ensaio de desgaste tipo Amsler, do Laboratório de Rochas Ornamentais do CPMTC (Instituto de Geociências – UFMG).

Conforme definido pela norma NBR 12042 (ABNT, 1992), foram utilizados corpos-

de-prova na forma de paralelepípedos regulares, com base de 70 ± 2 mm e altura entre 25 e 50 mm. As medidas foram feitas ao término de 250 voltas, correspondente a 500 m, e ao término de 500 voltas, correspondente a 1000 m. Entre a primeira e a segunda etapa, os corpos-de-prova foram invertidos nas sapatas de acoplamento, para evitar um possível enviesamento por diferença entre os dois lados do aparelho. As medidas de redução de altura dos corpos-de-prova foram feitas em quatro lados do corpo de prova e o resultado do ensaio foi calculado pela média de redução de altura dos respectivos corpos-de-prova, após percurso de 1000 m na pista.

Devido às rochas avaliadas serem foliadas, para cada litotipo foram realizados ensaios com corpos-de-prova com face exposta à abrasão paralela à foliação e ensaios com corpos-de-prova com face exposta à abrasão perpendicular à foliação.

Importante observar que, com exceção dos xistos de Passagem de Mariana, os materiais estudados são rochas sãs. Portanto o grau de alteração não constituiu, para quase todos os litotipos estudados, um fator de influência na resistência ao desgaste por abrasão. Assim, na avaliação dos resultados dos ensaios foram consideradas essencialmente o tamanho dos grãos e a composição mineralógica, uma vez que a dureza dos minerais que compõem a rocha tem relação direta com a resistência à abrasão.

A Tabela 4.11 contém lista de valores da escala Mohs de dureza dos principais componentes das rochas estudadas (Deer *et al.*, 1992).

Tabela 4.11 - Valores para escala Mohs de dureza dos principais minerais constituintes das rochas estudadas (Deer *et al.* 1992).

Mineral	Dureza
Talco	1
Biotita	2,5-3
Clorita	2-2,5
Mica branca	2-2,5
Calcita	3
Ankerita	3,5
Magnesita	3,5 a 5
Cianita	5 a 7
Albita	6 a 6,5
Granada	6,5 a 7,5
Quartzo	7
Cordierita	7 a 7,5
Estaurolita	7 a 7,5
Andaluzita	7,5

Dos sete litotipos estudados, destacam-se pela baixa resistência ao desgaste o albita-carbonato-clorita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de **Caeté** e o cromita-clorita-carbonato-talco xisto, coletado próximo à cidade de **Serro**. No primeiro caso, o xisto verde tem por volta de 30% de quartzo, se comparado com as outras rochas, que tem por volta de 40 a 45% deste mineral (Tabela 4.12). Já o xisto ultramáfico é composto predominantemente por talco e carbonato, minerais extremamente macios.

O granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, coletado próximo à localidade de **Passagem de Mariana**, tem o desgaste por abrasão mais elevado entre as rochas peraluminosas. Sua composição mineralógica e tamanho médio dos cristais são semelhantes àqueles encontrados para o granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto, coletado próximo a Sabará. O primeiro difere dos demais por apresentar um grau de alteração mais elevado, com grau de coerência menor em relação aos outros materiais, partindo-se com facilidade ao golpe do martelo. Esta diferença se reflete na resistência à abrasão.

O estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo a **Araçuaí**, é o mais resistente à abrasão, com os menores valores de desgaste (Tabela 4.12). Embora ele tenha um percentual de quartzo em sua composição (40-45%) muito próximo aos dos outros xistos peraluminosos que sofreram maior desgaste, possui menor porosidade, granulação mais fina e um bom entrelaçamento entre os cristais, com predomínio de contato curvos entre os grãos.

Tabela 4.12 - Resultados do ensaio de resistência ao desgaste por abrasão, tamanho e percentual dos cristais de quartzo, porosidade aparente.

	Desgaste Amsler			Cristais de quartzo		Porosidade aparente
	face //	face ⊥	Anisotropia	μm	%	
	mm	mm	%			
Folhelhos e xistos peraluminosos						
Paraopeba	4,1	1,9	53%	4	40-45	0,6
Sabará	4,5	2,6	43%	29	35-40	0,5
P. de Mariana	7,0	4,5	35%	30	30-40	1,2
Araçuaí	2,9	1,3	56%	34	40-45	0,3
Itinga	3,5	0,9	74%	80	43-48	0,8
Média	4,4	2,2	52%	35	40	0,7
Xisto verde e xisto ultramáfico						
Caeté	9,8	5,5	44%	33	25-30	0,7
Serro ¹	20.0	14.8	26%	381	0	0.8

¹ Carbonato, predominantemente magnesita (dureza 3,5-4,5).

Para todo o conjunto de materiais submetidos aos ensaios de desgaste por abrasão, foi observada uma importante diferença entre os valores encontrados para um mesmo material, mas com corpos-de-prova com orientações distintas em relação ao plano de foliação. Os corpos-de-prova com as faces expostas à abrasão perpendiculares à foliação apresentaram desgastes menores do que os corpos-de-prova com as faces expostas à abrasão paralelas à foliação (Tabela 4.12). A diferença média foi da ordem de 200%, com valores entre 154% e 387% para os xistos peraluminosos, 178% para o xisto verde e 134% para o xisto ultramáfico.

O cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de **Itinga**, foi o material que apresentou a maior diferença entre os valores de desgastes de faces expostas à abrasão paralelas à foliação e de faces expostas à abrasão perpendiculares à foliação. Os corpos-de-prova com a face perpendicular à foliação apresentaram os menores valores de desgaste por abrasão de todo o conjunto estudado, com valor de 0,9 mm, contra uma média de 2,2 mm para o litotipos peraluminosos. Se, por um lado, este litotipo tem, em relação aos demais, cristais maiores e contatos retos, características que favorecem maior desgaste por abrasão, possui porfiroblastos de andaluzita e cordierita, minerais com dureza elevada, entre 7 e 7,5 (Deer *et al.* 1992). Em termos de percentual de quartzo em sua composição mineralógica, apresenta valores por volta de 40-45%, muito próximos da média de 40%, para as rochas peraluminosas.

4.3.3 Avaliação da dilatação térmica linear

Os ensaios para avaliação da dilatação térmica linear foram executados de acordo com a norma NBR 15845 Anexo C (ABNT, 2010). Os corpos-de-prova, cortados na forma de cilindros com altura de 90 ± 2 mm, foram medidos, aquecidos (dilatação) em banho ultratermostático (submersos em água) de 0° a 50°C e resfriados (contração), com o mesmo intervalo de temperatura. Os procedimentos foram realizados em equipamento da empresa Pavitest (Figura 4.43), que tem acoplado um sistema que registrou automaticamente os resultados de variação de comprimento ΔL e de temperatura ΔT e o cálculo do coeficiente de dilatação (β).



Figura 4.43 - Máquina para ensaio de dilatação térmica linear, do Laboratório de Rochas Ornamentais do CPMTC (Instituto de Geociências – UFMG).

Para o conjunto de rochas avaliadas, os valores médios obtidos variaram entre 8×10^{-3} mm/m°C e 10×10^{-3} mm/m°C, com média geral de 9×10^{-3} mm/m°C para ensaios com eixos dos corpos-de-prova paralelos à foliação. Os ensaios realizados com eixos dos corpos-de-prova perpendiculares à foliação apresentaram valores entre 7×10^{-3} mm/m°C e 9×10^{-3} mm/m°C, com média de 8×10^{-3} mm/m°C (Tabela 4.13). São valores relativamente altos, se considerarmos que as descontinuidades planares tendem a diminuir a dilatação térmica linear. Mas outro aspecto que influencia a dilatação é a composição mineralógica. Estas rochas apresentam de 35 a 50% de filossilicatos em sua composição. Meyer (2003) associa valores mais altos de dilatação térmica linear a um elevado percentual de micas. De acordo com Rzhovsky & Novik (1971 apud: Lima, 2002), as micas e os sulfetos são os minerais de maior coeficiente de dilatação térmica: as micas apresentam β entre $21-34 \times 10^{-3}$ mm/m°C e os sulfetos valores de β entre $74-80 \times 10^{-3}$ mm/m°C. Entre os minerais carbonáticos, a dolomita tem β igual a 12×10^{-3} mm/m°C, a calcita apresenta elevada anisotropia, com valores β entre $5,4$ a 26×10^{-3} mm/m°C, para dilatação paralela e perpendicular à clivagem do mineral, respectivamente.

Tabela 4.13 - Valores de coeficiente de dilatação para as rochas estudadas, com medidas realizadas em corpos-de-prova com eixo paralelo e perpendicular à foliação e diferença de valores entre as duas direções.

	Eixo paralelo à foliação			Eixo perpendicular à foliação			Anisotropia // × ⊥ %
	β1	β2	média	β1	β2	média	
	aquecimento	resfriamento		aquecimento	resfriamento		
	10 ⁻³ mm/m°C			10 ⁻³ mm/m°C			
Folhelho e xistos peraluminosos							
Paraopeba	10,61	7,38	9,00	7,69	7,65	7,67	15%
Sabará	8,47	8,75	8,61	8,01	8,74	8,38	3%
P. de Mariana	7,72	8,73	8,23	7,85	8,15	8,00	3%
Araçuaí	9,68	9,43	9,56	9,22	8,45	8,84	8%
Itinga	10,05	7,04	8,55	7,97	6,45	7,21	16%
Média			8,79			8,02	11%
Mínimo			8,23			7,21	3%
Máximo			9,56			8,84	18%
Xisto verde e xisto ultramáfico							
Caeté	12,04	8,09	10,07	9,67	7,09	8,38	17%
Serro	12,18	7,44	9,81	10,03	7,11	8,57	13%

O xisto verde e o xisto ultramáfico, coletados próximo a **Caeté** e **Serro**, respectivamente, apresentam cristais de carbonato como um dos principais componentes das rochas e foram os materiais com os maiores valores para dilatação, seguidos pelo estauroлита-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de **Araçuaí**, que têm a porosidade mais baixa do grupo de rochas estudado: 0,25% para uma média de 0,70%. Os menores valores de dilatação foram apresentados pelo granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, coletado próximo à localidade de **Passagem de Mariana**, que têm porosidade mais elevada (1,16%), em relação ao conjunto. Pesquisas anteriores realizadas em rochas graníticas apresentaram uma relação inversa entre porosidade e dilatação (Meyer, 2003; Mattos, 2005; Costa, 2007). Navarro (2006), em estudo com tratamento estatístico de dados de rochas ornamentais, identificou uma tendência inversamente proporcional entre coeficientes de dilatação térmica linear e porosidade, embora com baixo percentual de correlação.

Todas as amostras avaliadas apresentaram sistematicamente a dilatação com o eixo paralelo ao plano de foliação maior que a dilatação perpendicular ao eixo. Os materiais que apresentaram as maiores diferenças entre a dilatação paralela à foliação e a perpendicular foram, entre as rochas peraluminosas, o cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado na região de Itinga, e o folhelho (ardósia cinza) da região de Paraopeba, com diferenças de 16% e 15%, respectivamente. O xisto verde, coletado próximo à cidade de

Caeté, também mostrou uma diferença da ordem de 17%. Estas rochas são as que apresentam as descontinuidades planares (foliação ou bandamento) mais bem definidas e nos corpos-de-prova com eixo perpendicular à foliação, parte da dilatação da rocha é absorvida pelo fechamento das descontinuidades físicas relacionadas aos planos da foliação. Segundo Frazão (2002), rochas foliadas e/ou bandadas tem dilatação maior na direção paralela ao bandamento ou à foliação, devido ao melhor embricamento intercristalino nesta direção.

4.3.4 Avaliação da resistência à compressão uniaxial

As rochas estudadas são foliadas e, portanto, conforme definido pela norma NBR 15845 Anexo E (ABNT, 2010), foram preparados corpos-de-prova paralelos e perpendiculares à foliação. Os ensaios foram realizados em uma prensa hidráulica da empresa FORNEY (Figura 4.44).



Figura 4.44 - Prensa hidráulica da empresa FORNEY, para ensaios de resistência à compressão (LABTECRochas /CPMTC – Instituto de Geociências – UFMG).

Os resultados dos ensaios estão reunidos na Tabela 4.14.

No conjunto de rochas peraluminosas, o **folhelho** (“ardósia cinza”), coletado próximo à cidade de **Paraopeba**, foi o litotipo com maior resistência à compressão para carga aplicada perpendicular à foliação da rocha, com valores de 162 MPa. Para carga aplicada paralela à

foliação da rocha, a resistência à compressão foi a menor entre as rochas peraluminosas, com 53 MPa. Esse litotipo apresenta os valores mais altos e os mais baixos, quando submetidos a cargas perpendiculares e paralelas, que refletem uma grande diferença de comportamento da rocha, frente à direção dos esforços. Nos xistos peraluminosos, os resultados para carga aplicada perpendicular à estrutura da rocha, foram muito próximos, com valores entre 99 MPa e 102 MPa. Já nos ensaios de resistência à compressão com força aplicada paralela à foliação, o granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de **Sabará** e o estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de **Araçuaí**, apresentaram valores mais baixos que aqueles medidos para o cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de **Itinga**, respectivamente 73 MPa, 77 MPa e 92 MPa. O xisto verde coletado próximo a **Caeté** tem comportamento semelhante aos xistos peraluminosos, com valores de 100 MPa e 67 MPa (Tabela 4.14).

O xisto ultramáfico coletado próximo à cidade de **Serro**, com composição mineralógica formada por cromita, clorita, carbonatos e talco, foi o litotipo com menor resistência à compressão, com valores extremamente baixos: 18 MPa para a carga do ensaio perpendicular à estrutura da rocha e 16 MPa para a carga do ensaio paralela à estrutura da rocha.

Todos os materiais apresentaram sistematicamente valores de resistência mais elevados quando os esforços foram aplicados perpendiculares à foliação.

Tabela 4.14 - Valores de resistência à compressão uniaxial, com medidas realizadas em corpos-de-prova com força aplicada paralela e perpendicular à foliação e anisotropia.

	carga perpendicular à foliação MPa	carga paralela à foliação MPa	Anisotropia %
Folhelho e xistos peraluminosos			
Paraopeba	162,07	52,90	67%
Sabará	102,64	72,77	29%
Passagem de Mariana	-	-	-
Araçuaí	101,07	77,03	24%
Itinga	99,33	92,20	7%
Média	116,26	73,73	32%
Mínimo	99,33	52,90	7%
Máximo	162,07	92,20	67%
Xisto verde e xisto ultramáfico			
Caeté	100,1	67,3	33%
Serro	18,20	16,10	12%

4.3.5 Avaliação da resistência à flexão

Para avaliar a resistência das rochas estudadas quanto à flexão foram realizados ensaios segundo a norma NBR 15845 Anexo F (ABNT, 2010), que trata da determinação da resistência à flexão por carregamento em três pontos e mede o esforço fletor que provoca a ruptura da rocha. Os ensaios foram realizados em uma prensa hidráulica da empresa TINIUS OLSEN, modelo H25K-S (Figura 4.45). As rochas estudadas são estruturadas e, portanto, conforme definido pela norma, foram preparados corpos-de-prova paralelos e perpendiculares à foliação.



Figura 4.45 - Prensa hidráulica da empresa TINIUS OLSEN, modelo H25K-S para ensaios de resistência à flexão (LABTECRochas /CPMTC – IGC – UFMG).

Os resultados dos ensaios constam na Tabela 4.15. No conjunto de rochas peraluminosas, o granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de **Sabará** e o estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de **Araçuaí**, apresentaram valores de flexão extraordinariamente elevados: 63 MPa e 60 MPa, para carga aplicada perpendicular à xistosidade da rocha, e 46 MPa e 42 MPa, para carga aplicada paralela. O folhelho, coletado próximo a **Paraopeba**, apresentou valores de flexão de 50 MPa para carga aplicada perpendicular à estrutura da rocha e 44 MPa para carga aplicada paralela à estrutura da rocha. Com valores bem abaixo, mas ainda elevados para resistência à flexão, o cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de **Itinga**, apresentou valores de 19 MPa e 16 MPa, para cargas perpendiculares e

paralelas, respectivamente (Tabela 4.15).

Como representante do xisto verde, o albita-carbonato-clorita-quartzo xisto, com amostras coletadas próximo a **Caeté**, apresentou valores de 27 MPa e 21 MPa, para cargas perpendiculares e paralelas, respectivamente (Tabela 4.15).

O cromita-clorita-carbonato-talco xisto, coletado próximo a **Serro**, foi o litotipo com menor resistência à flexão, com valores extremamente baixos: 1,5 MPa para a carga do ensaio perpendicular à estrutura da rocha e 1,4 MPa para a carga do ensaio paralela à estrutura da rocha. Entre um conjunto de fatores, que podem influenciar essa baixa resistência à flexão, destacam-se que os cristais de carbonato, que compõem de 20 a 30% da rocha, encontram-se frequentemente fraturados, além de influência significativa do microfissuramento e dos planos de clivagem desses mesmos cristais.

Excetuando-se o xisto ultramáfico, coletado próximo à cidade de **Serro**, que é muito pouco resistente à flexão, tanto os xistos peraluminosos, como o xisto verde, coletado próximo à cidade de **Caeté**, apresentaram valores elevados de resistência à flexão, com médias entre 19,5 MPa e 62,8 MPa para ensaios realizados com a carga aplicada perpendicular à estrutura e valores entre 15,9 MPa e 45,8 MPa para ensaios realizados com a carga aplicada paralela à estrutura.

Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios de resistência à flexão por três pontos.

	Resistência à Flexão 3 pontos			Tamanho dos cristais		
	carga ⊥ à estrutura MPa	carga // à estrutura MPa	Anisotropia %	média μm	coeficiente de variação	Porosidade aparente %
Folhelho e xistos peraluminosos						
Paraopeba	49,7	44,0	11%	4	47%	0,61
Sabará	62,8	45,8	27%	29	79%	0,48
P. de Mariana	-	-	-	30	56%	1,16
Araçuaí	60,3	41,9	31%	34	55%	0,25
Itinga	19,5	15,9	18%	80	51%	0,84
Média	48,1	36,9	22%	35	58%	0,68
Mínimo	19,5	15,9	11%	4	47%	0,25
Máximo	62,8	45,8	31%	80	79%	1,16
Xisto verde e xisto ultramáfico						
Caeté	27,4	20,9	24%	50*	84%	0,75
Serro	1,5	1,4	7%	381**	60%	0,79

* Quartzo, albita, carbonato.

** Carbonato

5. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

No grupo das rochas peraluminosas estudadas, todas têm composições químicas semelhantes, granulação fina e descontinuidades planares. Este grupo de rochas, que têm origem de sedimentos argilosos e sílticos, é representado por um folhelho do Grupo Bambuí, dois xistos do Grupo Sabará e dois xistos da Formação Ribeirão da Folha, unidade distal do Grupo Macaúbas. Em função de diferenças nas condições dos eventos metamórficos responsáveis pela geração de cada uma dessas rochas estudadas, as mesmas apresentam composições mineralógicas e aspectos texturais distintos, que se refletem nos comportamentos destes materiais quando submetidos a esforços mecânicos e processos de alteração.

O folhelho, coletado próximo à cidade de Paraopeba, em região intracratônica do Cráton do São Francisco, encontra-se no limite entre o processo diagenético e o metamorfismo incipiente. Os xistos peraluminosos, coletados próximo às cidades de Sabará e Passagem de Mariana, situam-se no Quadrilátero Ferrífero, limite sudeste entre o Cráton do São Francisco e suas faixas marginais orientais. Esses xistos contêm clorita, estauroлита e cianita, indicando que os mesmos foram formados sob condições da fácies anfibolito baixo. Os xistos peraluminosos, coletados entre as cidades de Araçuaí e Itinga, estão localizados no setor norte da Faixa Araçuaí, região do Médio Vale Jequitinhonha e apresentam associações mineralógicas típicas de fácies anfibolito médio a alto e representam os limites superiores do metamorfismo deste conjunto de rochas de filiação pelítica.

O xisto metavulcânico da região de Caeté é uma rocha formada em metamorfismo de fácies xisto verde, com assembleia mineral da zona da clorita e alterada hidrotermalmente com processo de carbonatação. No xisto ultramáfico, coletado próximo a Serro, o metamorfismo atingiu a fácies anfibolito, com retrometamorfismo para fácies xisto verde e processo de alteração hidrotermal com enriquecimento em cromo (Zapparoli, 2001).

O folhelho da região de Paraopeba e o cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de Itinga, no Médio Jequitinhonha, representam os extremos em termos do grau metamórfico. O folhelho situa-se em região intracratônica e não foi submetido a condições de metamorfismo importantes, já o cordierita-andaluzita-biotita-quartzo xisto, coletado em Itinga, situa-se no cinturão metamórfico externo do Orógeno Araçuaí e foi submetido a condições metamórficas de fácies anfibolito. Apesar de possuírem composições químicas muito próximas, apresentam características texturais muito distintas, que se refletem nas propriedades tecnológicas. O folhelho é uma rocha de granulação muito mais fina que o xisto peraluminoso de Itinga, além de ser mais homogênea, em termos de

tamanho de grãos e distribuição dos minerais da rocha. Em contraposição, o cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à Itinga, apresenta palhetas de biotita muito bem desenvolvidas e orientadas, cristais de quartzo recristalizados e poiquiloblastos de andaluzita e cordierita. Segundo Spry (1986), estes dois últimos minerais possuem uma tendência a formar porfiroblastos, sendo esta uma textura típica de metamorfismo termal. Os cristais de quartzo, quando associados com palhetas de biotita, ocorrem alongados, seguindo a forma desses filossilicatos, enquanto que nas porções monominerálicas, o processo de recristalização gerou cristais de quartzo com contatos poligonais. Assim, as condições metamórficas próprias de cada litotipo refletem-se nas diferenças texturais, que, por sua vez, se refletem nas propriedades mecânicas dos litotipos.

Excetuando-se o xisto coletado próximo a Passagem de Mariana, cujas amostras apresentam-se mais alteradas que os demais materiais, o conjunto de rochas peraluminosas apresenta valores de densidade aparente próximos, com uma diferença de 4% entre o mínimo e o máximo (Tabela 5.1). No entanto, a porosidade e a absorção apresentam diferenças significativas, onde o valor máximo é aproximadamente três vezes o valor mínimo. Essa proporção entre a porosidade e a absorção d'água é observada no folhelho (0,61% e 0,22%), no xisto coletado próximo a Sabará (0,48% e 0,17%), no xisto coletado próximo a Araçuaí (0,25% e 0,09%) e no xisto coletado próximo a Itinga (0,84% e 0,30%). No granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de Sabará, e no estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de Araçuaí, o tamanho médio e a distribuição do tamanho dos cristais de quartzo são semelhantes, com padrão log-normal e forte assimetria para grãos finos (Figura 5.1). No entanto, o xisto do Grupo Sabará tem uma porosidade cerca de 50% mais elevada. Segundo Spry (1986), condições de $P \times T$ mais severas provocam rearranjos texturais que se refletem em uma diminuição da porosidade. Para o caso avaliado, o xisto, coletado no Médio Jequitinhonha, no setor norte da Faixa Araçuaí, está situado em um domínio de grau metamórfico mais alto do que aquele do folhelho coletado próximo à Paraopeba, em região central da bacia intracratônica Bambuí, e do xisto peraluminoso do Grupo Sabará, coletado na borda norte do Quadrilátero Ferrífero. No entanto, entre as rochas sãs, o cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de Itinga, é o que apresenta a maior porosidade e absorção d'água do conjunto. Para este caso, o metamorfismo, com temperaturas mais altas, atuou favorecendo a recristalização dos cristais, levando ao desenvolvimento de uma foliação mais bem definida e cristais maiores com contatos retos, aspectos estes que favorecem a percolação de água. Importante observar que mesmo que possua cristais maiores

em relação às demais, esse xisto ainda guarda uma característica de textura muito fina, sendo constituída por grãos submilimétricos, conjuntamente com um contraste de tamanho pela presença de porfiroblastos centimétricos.

Estudos anteriores analisaram a influência do intemperismo sobre propriedades geomecânicas de diversos tipos de rochas e observaram o aumento da porosidade e o decréscimo da resistência à compressão em rochas intemperizadas (Shakoor & Bonelli, 1991; Kasim & Shakoor, 1996; Gupta & Rao, 2000). Tuğrul (2004) atribui este decréscimo da resistência à compressão uniaxial ao aumento da porosidade da rocha, que por sua vez foi causado pelo intemperismo. Esse aspecto explica os valores encontrados para as propriedades geomecânicas para as amostras do granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, coletadas próximo à localidade de Passagem de Mariana-MG, visto que essas eram as mais intemperizadas do conjunto. Esse material é semelhante ao granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de Sabará, em termos de condições metamórficas, composição mineralógica, tamanho e orientação de grãos. No entanto, os valores de porosidade e absorção d'água diferem em cerca de 250% e o desgaste por abrasão, para o xisto coletado em Passagem de Mariana, é 150% maior em relação ao coletado próximo a Sabará.

Para avaliação dos resultados de caracterização tecnológica, os valores dos ensaios realizados nessa pesquisa foram comparados com as especificações apresentadas por Frazão (2002) para rochas destinadas a revestimentos. Devido ao fato deste autor não especificar limites para rochas xistosas, em nossos estudos para o grupo de rochas peraluminosas e para o xisto metavulcânico de Caeté foram usados como referências os valores sugeridos para rochas silicáticas. Para o xisto ultramáfico de Serro foram usados como referências os mármore serpentínicos, porque dentre as classes disponíveis, são os que mais se aproximam do carbonato-talco xisto (Tabela 5.1).

Nas especificações para rochas silicáticas propostas por Frazão (2002), constam valores de porosidade aparente inferiores a 1% e valores de absorção d'água inferiores a 0,4%. Com exceção do xisto de Passagem de Mariana, cujas amostras estão alteradas, os outros materiais avaliados estão dentro destas especificações. Todos os materiais analisados têm densidade aparente com valores superiores a 2600 kg/cm³, acima do valor mínimo sugerido pelo autor, que é de 2550 kg/cm³, e índices próximos aos das rochas graníticas citadas como referência (Tabela 5.1).

Os ensaios de resistência ao desgaste por abrasão revelaram que os xistos peraluminosos perderam entre 2,9 mm a 7,0 mm, que são valores altos, se comparados com o

valor limite especificado por Frazão para rochas silicáticas, que deve ser menor que 1 mm. No entanto, xistos portugueses produzidos comercialmente apresentam desgaste por abrasão de 7,6 mm (INETI, 2007), valor maior que o encontrado para o xisto de Passagem de Mariana, com desgaste de 7 mm, com a consideração que o material amostrado deste último apresenta uma alteração incipiente.

Com relação aos resultados de desgaste por abrasão do xisto verde, coletado na região de Caeté, e do xisto ultramáfico, coletado próximo a Serro, os valores obtidos foram altos, mas dentro do esperado para suas composições mineralógicas. Nos limites sugeridos por Frazão (2002) para mármore serpentínicos, não foram especificados valores para o desgaste por abrasão. Na ausência de um tipo similar, esses mármore serpentínicos foram escolhidos como referência para o carbonato-talco xisto de Serro. Esta é uma rocha notoriamente macia, não indicada para aplicação em áreas sujeitas ao desgaste por abrasão. O processo de desgaste dos pisos feitos com o carbonato-talco xisto, observado no estudo de caso da Chácara do Barão do Serro, é coerente com os resultados dos ensaios de abrasão realizados neste material, que apresentaram valores extremamente altos, da ordem de 20 mm (como referência, o desgaste por abrasão médio de um granito é da ordem de 0,3 a 0,7 mm).

Para o desgaste realizado na face paralela à foliação, o estauroлита-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de Araçuaí, apresenta os menores valores. No conjunto de rochas peraluminosas avaliadas, os percentuais de quartzo são muito semelhantes. Esse mineral é usado como referência porque entre os principais componentes das rochas, são os mais duros: 7 contra 2 a 3, na escala Mohs, para os filossilicatos, que são os segundos em ordem de quantidade nesses litotipos. Um maior embricamento entre os grãos pode estar associado a esse comportamento, uma vez que nessa rocha predominam contatos curvos a interlobados entre grãos. A rocha apresenta também os menores valores para absorção d'água e porosidade aparente. Trata-se de um exemplo interessante sobre a influência da textura sobre a resistência mecânica dos materiais.

Nos corpos-de-prova com faces expostas à abrasão perpendiculares à foliação, foram encontrados valores de desgaste sistematicamente menores do que aqueles para corpos-de-prova com faces expostas à abrasão paralelas à foliação. A anisotropia entre o valor do desgaste, realizado com corpos-de-prova perpendiculares, em relação ao valor com corpos-de-prova dispostos paralelamente à foliação, variou entre 35% a 69% a mais. Segundo Åkesson *et al.* (2001) os grãos minerais mais finos têm uma superfície menor exposta à abrasão e a relação do comprimento e largura das cavidades ou fissuras aumenta à medida que aumenta o tamanho do grão. Projetando essa correlação entre superfície exposta à abrasão com a

resistência ao desgaste, nos corpos-de-prova cortados perpendiculares à foliação, a área de exposição dos minerais é menor, por efeito de sua orientação preferencial nos planos de xistosidade. O ensaio realizado com corpos-de-prova do cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, com face exposta perpendicular à foliação, foi o único com valor de desgaste inferior a 1%. O percentual de quartzo é próximo ao presente nas outras rochas peraluminosas avaliadas e nele predominam contatos retos entre os grãos, além de ter uma porosidade elevada. Estes aspectos poderiam, a princípio, torná-lo menos resistente à abrasão. No entanto, esse litotipo tem em sua composição cerca de 10 a 15% de porfiroblastos de cordierita e andaluzita, que tem dureza de 7 a 7,5, na escala *Mohs*.

Entre as rochas avaliadas, houve pouca variação para os valores de dilatação térmica linear. O granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, coletado próximo a Passagem de Mariana, apresentou o menor valor, com $8,2 \times 10^{-3}$ mm/m°C nos ensaios realizados com corpos-de-prova com eixo paralelo à foliação e $8,0 \times 10^{-3}$ mm/m°C nos ensaios com eixo perpendicular à foliação. No conjunto, as amostras coletadas desse litotipo são as mais alteradas. Entre as rochas peraluminosas sãs, o folhelho e cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto foram as que apresentaram os menores valores de dilatação, apesar de estarem em extremos opostos, em termos de tamanho de grãos, respectivamente com 4 µm e 80 µm para os cristais de quartzo. Os litotipos com maiores valores de dilatação térmica linear foram o granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto, coletado próximo a Araçuaí, o xisto verde, coletado próximo a Caeté, e o xisto ultramáfico coletado próximo a Serro. Estas três rochas diferem muito em termos composicionais e texturais. O estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto possui a menor porosidade e o maior percentual de filossilicatos entre as rochas peraluminosas estudadas, com 50-55% contra valores de 45-50% para o restante do conjunto. Já o xisto verde e o xisto ultramáfico apresentam minerais carbonáticos, com 20-25% e 30-40%, respectivamente. Para todas as rochas avaliadas neste estudo, os valores de coeficientes de dilatação térmica linear estão abaixo de 10×10^{-3} mm/m°C. Embora os valores de dilatação térmica nos xistos sejam de 17% a 37% maiores que aqueles valores médios para as rochas graníticas brasileiras (Tabela 5.1), esses não ultrapassam o valor limítrofe estipulado por Frazão (2002) para rochas silicáticas, que é de 12×10^{-3} mm/m°C. Assim, para esta propriedade tecnológica, as rochas foliadas estudadas mostraram-se qualificadas para sua aplicação como rochas ornamentais.

Nos ensaios de resistência à compressão, o folhelho e o xisto ultramáfico estão em extremos da tabela de valores. No caso do folhelho, os valores extremamente altos para ensaios realizados perpendiculares à foliação são coerentes com resultados disponíveis para

consulta no estudo das ardósias de Minas Gerais³, conduzido pela COMIG (Grossi Sad *et al.*, 1998), onde ensaios realizados no laboratório do CETEC-MG, em ardósia cinza clara, com valor de resistência à compressão de 166 MPa.

Em termos gerais, as rochas silicáticas apresentam uma correlação entre resistência à flexão e resistência à compressão uniaxial, com valores próximos a 10%. Resultados de ensaios presentes na literatura confirmam essa relação, com variações entre 7% a 20%, influenciadas por aspectos texturais e composicionais (Casal-Moura, 2000; Mattos, 2005; Meyer, 2003; Navarro; 2006). Para os xistos, essa relação não se mantém. Para ensaios realizados com a carga aplicada perpendicularmente à foliação, nas rochas peraluminosas, esses valores variaram de 20% a 61%; no xisto verde a razão flexão/compressão foi de 27%. O xisto ultramáfico apresenta uma relação próxima aos valores para rochas silicáticas, 8%. No entanto, no conjunto estudado, são *outliers*, por seus valores extremamente baixos.

Frazão (2002) sugere valores de resistência à flexão superiores a 10 MPa para as rochas silicáticas. No caso dos xistos peraluminosos avaliados, todos os valores obtidos para resistência à flexão estão acima deste limite, com valores entre 19,5 MPa e 62,8 MPa. Entre as rochas estudadas, os três litotipos mais resistentes têm um valor médio de resistência à flexão de 58 MPa. O cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de Itinga, apresenta um comportamento diferenciado no grupo. Tem valores de resistência à flexão bem abaixo dos anteriores (19,5 MPa). Nesse litotipo, a presença de porfiroblastos milimétricos a centimétricos de andaluzita e cordierita, dispostos pela rocha com uma maior dispersão da orientação dos cristais, constituem um grande contraste para o restante dos cristais, que são extremamente finos e bem orientados, com tamanhos de grãos submilimétricos. Esse aspecto confere à rocha um caráter textural extremamente heterogêneo. O comportamento flexível é típico de minerais com estruturas em folhas, como os filossilicatos. Os valores de resistência à flexão do xisto verde (27.4 MPa) aproximam-se dos valores do xisto peraluminoso menos resistente e assim como ele, apresenta porosidade mais elevada, com 0,75%. Estudos anteriores apontam uma correlação negativa entre resistência à flexão e porosidade para arenitos (Scott & Nielsen, 1991), dolomitos (Hatzor *et al.*, 1997) e rochas graníticas (Arrais, 2006).

Em texto sobre as características técnicas da ardósia italiana, Cortesogno & Mannoni (1995) apontam que, por causa de sua granulação muito fina e organização dos minerais em uma estrutura compacta, as chapas dessas rochas apresentam elasticidade e elevada resistência

³ A referida ardósia brasileira foi considerada na tese como um folhelho.

à flexão. Nos folhelhos ou nas ditas ardósias brasileiras essa relação se mantém, conforme os resultados encontrados para os índices físicos e os ensaios de flexão.

O cromita-clorita-carbonato-talco xisto apresenta valores extremamente baixos para a resistência à compressão (18,2 MPa e 16,1 MPa) e à flexão (1,4 MPa a 1,5 MPa). É uma rocha com tamanho médio de grãos dez vezes maior que a média das outras rochas avaliadas e um percentual grande de carbonatos, cujos planos de clivagem podem influenciar este comportamento frágil, além das microfraturas, que estão presentes dos cristais maiores dos carbonatos, com maior microfissuramento do que os cristais de granulação mais fina. Na Chácara do Barão do Serro, onde foi empregado material similar, é comum a perda de fragmentos nos balaústres e poltronas elaboradas nesse material, principalmente nas quinas. Essa é uma alteração coerente com os resultados dos ensaios de resistência à compressão e de resistência à flexão, que revelaram valores extremamente baixos para corpos-de-prova do mesmo litotipo empregado nos trabalhos de cantaria.

Trabalhos anteriores (Navarro *et al.*, 1999) encontraram para “granitos” ornamentais (rochas silicáticas), uma correlação direta entre o percentual de biotitas e a resistência à flexão R_F , expressa pela equação $R_F = 0,1938 \times (\% \text{biotita}) + 15,495$. Com o objetivo de verificar a persistência desta correspondência para as rochas foliadas estudadas, a equação foi aplicada aos xistos peraluminosos do Médio Jequitinhonha, que possuem respectivamente $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$ de biotita e valores de resistência à flexão de 60,3 MPa e 19,5 MPa, obtidos em ensaios realizados com a carga aplicada perpendicularmente à foliação. Pela equação de regressão linear foram encontrados valores de 19,4 MPa e 23,2 MPa, revelando que, para o caso específico destes xistos, a correlação entre percentual de biotita e resistência à flexão não se mantém. Para as rochas avaliadas, a comparação dos valores de resistência à flexão com os aspectos petrográficos indicou que as relações texturais e estruturais têm maior influência sobre esta propriedade tecnológica do que a composição mineralógica. De modo geral, para este grupo de rochas os valores obtidos nos ensaios de resistência à flexão são muito elevados, com valores entre 19,5 MPa e 62,8 MPa (Tabela 5.1) Estes materiais são, portanto, particularmente adequados a aplicações onde estejam sujeitos a esforços em condições com vãos livres.

A Figura 5.1 apresenta gráficos dos parâmetros geométricos para as rochas estudadas. Nos histogramas dos tamanhos de grãos, em todos os gráficos foi atribuído o mesmo limite para o eixo Y, com o objetivo de favorecer a comparação entre os padrões de distribuição.

Tabela 5.1 - Resultados obtidos dos ensaios de caracterização tecnológica para as rochas xistosas estudadas; valores de referência de rochas brasileiras e portuguesas; especificações para rochas de revestimento, conforme proposta de Frazão (2002).

	Índices Físicos			Desgaste Amsler			Dilatação térmica linear			Compressão Uniaxial			Resistência à Flexão 3 pontos		
	Densidade	Porosidade	Absorção d'água	Face // foliação	Face ⊥ foliação	Anisotropia	Eixo // foliação	Eixo ⊥ foliação	Anisotropia	Carga ⊥ foliação	Carga // foliação	Anisotropia	Carga ⊥ foliação	Carga // foliação	Anisotropia
	kg/m ³	%	%	mm			10-3 mm/m°C			MPa			MPa		
Folhelho e xistos peraluminosos															
Paraopeba	2718	0,61	0,22	4,1	1,9	53%	9,0	7,7	15%	162,1	52,9	67%	49,7	44,0	11%
Sabará	2829	0,48	0,17	4,5	2,6	43%	8,6	8,4	3%	102,6	72,8	29%	62,8	45,8	27%
P. Mariana	2611	1,16	0,44	7,0	4,5	35%	8,2	8,0	3%	-	-		-	-	
Araçuaí	2793	0,25	0,09	2,9	1,3	56%	9,6	8,8	8%	101,1	77,0	24%	60,3	41,9	31%
Itinga	2761	0,84	0,30	3,5	0,9	74%	8,5	7,2	16%	99,3	92,2	7%	19,5	15,9	18%
Média	2742	0,67	0,25	4,4	2,2	52%	8,8	8,0	9%	116,3	73,7	32%	48,1	36,9	22%
Xisto verde e xisto ultramáfico															
Caeté	2754	0,75	0,27	9,8	5,5	44%	10,1	8,2	18%	100,1	67,3	33%	27,4	20,9	24%
Serro	2936	0,79	0,27	20,0	14,8	26%	9,8	8,6	13%	18,2	16,1	12%	1,5	1,4	7%
Valores de referência ⁽¹⁾															
Granitos brasileiros (2)	2706	0,80	0,30	0,7	-		6,0	-		165	-		15	-	
Granitos portugueses (3)	2636	0,84	0,32	0,3	-		7,8	-		136	-		15	-	
Xisto português (4)	2730	3,40	1,20	7,6	-		7,8	-		39,2	-		32,7	-	
Rochas silicáticas (5)	>2550	<1	<0.4	<1	-		<12	-		>100			> 10	-	
Mármore serpentínico (5)	>2690	-	<0.75	-	-		-	-					> 7	-	

(1) Granitos segundo denominação comercial

(2) Valor médio de 15 tipos graníticos. Fonte: Mattos (2005), Meyer (2003).

(3) Valor médio de 48 amostras. Fonte: Casal-Moura (2000).

(4) Xisto de Mourão (Portugal). Fonte: INETI (2007).

(5) Limites sugeridos por Frazão, 2002

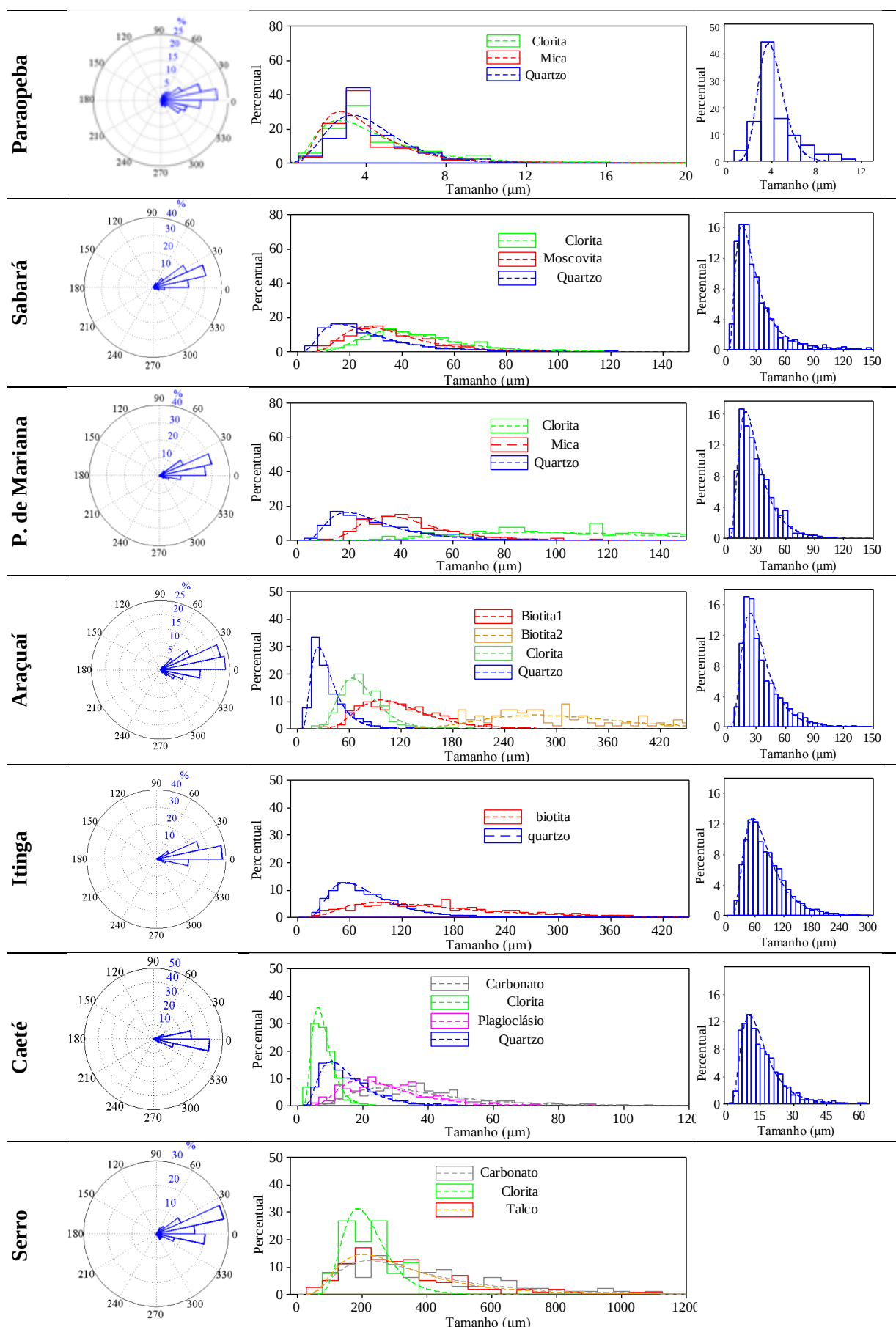


Figura 5.1 - Parâmetros geométricos para as rochas foliadas estudadas: histograma polar com lineação mineral; histograma do tamanho de grão dos principais constituintes e do quartzo.

Em termos gerais, as edificações históricas constituem-se laboratórios naturais para avaliação da resistência das rochas frente aos esforços mecânicos e à ação de agentes intempéricos.

Para a resistência mecânica, as alterações identificadas nos mapeamentos de estado de deterioração realizados na Igreja Matriz Nossa Senhora de Bonsucesso em Caeté (século XVIII) e na Chácara do Barão em Serro (século XIX) mostraram-se coerentes com os resultados obtidos nos ensaios tecnológicos. O material utilizado na Igreja Matriz de Caeté corresponde ao xisto verde com albita, carbonato, clorita e quartzo. O material utilizado nas peças em cantaria da Chácara do Barão corresponde ao xisto ultramáfico com carbonato e talco. Foi interessante observar a correspondência entre as patologias observadas nas peças de cantaria dos séculos XVIII e XIX e os resultados dos ensaios de caracterização.

O xisto peraluminoso observado no conjunto arquitetônico de Mariana é um bom exemplo da importância da aplicação adequada de materiais. Os arranques da escadaria da Casa de Câmara e Cadeia (Figura 5.2.a) e o muro lateral da Igreja de São Francisco são elementos em cantaria em bom estado de conservação. Apesar de estarem expostos às intempéries desde o século XVIII e localizados em uma região de movimentação permanente de pessoas, não foram identificadas alterações importantes, que comprometam esteticamente ou funcionalmente os elementos pétreos. Por outro lado, o mesmo material, quando empregado nos degraus da escadaria de acesso ao adro da Igreja de São Francisco apresenta estados de alteração variados (Figura 5.2.b). Esta variação entre os elementos de uma mesma rocha, instalados no mesmo local e forma de uso (degraus) e, portanto, submetidos a condições ambientais idênticas, permite inferir uma provável diferença no grau de intemperismo do material, já na fase de instalação.



(a)



(b)

Figura 5.2 - Casa de Câmara e Cadeia: (a) arranque da escadaria de acesso ao 2º piso; (b) Igreja São Francisco de Assis: degraus de acesso ao adro, Mariana-MG. Fotografias capturadas em setembro-2010.

Nos exemplos históricos de utilização de rochas xistosas, avaliados nessa tese, as principais alterações observadas, por ação de agentes intempéricos, foram o amarelamento devido à oxidação do Fe, presente em alguns minerais, e formação de microcavidades por lixiviação/desagregação de minerais. No cromita-clorita-carbonato-talco xisto, utilizado em elementos de cantaria na Chácara do Barão do Serro, edificação do século XIX, há cavidades formadas por dissolução de minerais carbonáticos. Nesse mesmo litotipo, há um amarelamento, predominantemente nas bandas carbonáticas, devido à presença de carbonatos de Fe. Segundo Winkler (1997), através do mecanismo de dissolução em água, o ferro oxida-se prontamente para a forma férrica, provocando o amarelamento do material.

Entre os casos estudados, aquele onde a alteração por colonização biológica mostrou maior intensidade e extensão foi dos elementos em cantaria da Chácara do Barão do Serro, que tem um posicionamento geográfico diverso em relação aos demais. Situa-se em um fundo de vale e cercado por uma mata com árvores de porte médio a alto, e, portanto, está sob a influência de um microclima úmido, que se reflete no maior desenvolvimento de microflora.

A disposição planar dos principais minerais constituintes das rochas avaliadas torna esses materiais extremamente anisotrópicos, em termos de resistência mecânica. Como todas as rochas apresentam cristais bem orientados (Figura 5.1), há uma dificuldade em se avaliar a influência do grau de orientação mineral sobre a anisotropia das propriedades tecnológicas. O folhelho distingue-se do restante por não apresentar lineação mineral definida, mas os cristais têm uma disposição planar preferencial no plano de foliação. No xisto de Araçuaí, o desenvolvimento de uma segunda geração de cristais de biotita, maiores e mais dispersos em termos de orientação planar, do que os cristais da primeira geração, aparentemente não afetou a resistência à flexão e o comportamento anisotrópico do material. Esse litotipo e o xisto coletado próximo à cidade de Sabará têm os maiores valores de resistência à flexão e a maior anisotropia para esta propriedade. As propriedades geomecânicas que apresentam maior anisotropia foram, em ordem crescente de diferença percentual, a dilatação térmica linear, a resistência à flexão por carregamento em três pontos, a resistência à compressão uniaxial e a resistência ao desgaste por abrasão. Com base nessas informações, quando esses materiais forem empregados em bancadas ou revestimentos horizontais, onde possam ser submetidos a esforços fletores, recomenda-se o uso de chapas cortadas concordantemente com a foliação. A exceção para essa recomendação é de cunho estético, quando cortes alternativos podem ser selecionados para conferir à rocha ornamental um caráter singular. Nesse caso, deve ser considerado o uso de soluções tecnológicas, como telamento e impregnação do material.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tese cumpriu o objetivo proposto, de avaliar a potencialidade do uso de rochas foliadas, mais especificamente xistos, como rochas ornamentais e para revestimento. A pesquisa partiu da observação de que os xistos, embora já tenham tido importância significativa na história arquitetônica em Minas Gerais, hoje são subutilizados na construção civil. Segundo o Sumário Mineral do Departamento Nacional da Produção Mineral-DNPM (2011), no capítulo referente a rochas ornamentais e de revestimento, a produção brasileira em 2010 foi de 8,9 Mt, distribuída por aproximadamente 50% de granitos e similares, 17% de mármore e travertinos, 8% de ardósia e 7% de quartzitos foliados. A publicação cita outros tipos de rocha (quartzitos maciços, pedra miracena, cariri, mourisca, basalto e pedra-sabão), que correspondem a 19%. Com exceção do folhelho, denominado comercialmente como ardósia, os xistos nem mesmo constam entre os tipos produzidos. Esses materiais têm suas condições de aplicação como rochas ornamentais pouco exploradas, pois se destacam por sua elevada resistência à flexão, além dos aspectos estéticos singulares, características que a tornam de interesse para aplicação em revestimentos e bancadas, nas edificações e espaços urbanos. Esse quadro pode ser revertido diante da comprovação de suas potencialidades e aplicabilidades.

A pesquisa realizada trouxe como principal contribuição à comprovação da viabilidade da utilização de xistos como rochas ornamentais, pois os resultados dos ensaios realizados em laboratório e os exemplos do patrimônio histórico avaliados indicam que as rochas estudadas têm características para essa aplicação. Os dados obtidos por meio da caracterização geomecânica, no âmbito desta tese, permitem que esses materiais sejam indicados para aplicações, onde os esforços a que serão submetidos estejam de acordo com suas propriedades tecnológicas. Para o conjunto de rochas de filiação pelítica, onde a propriedade de resistência à flexão mostrou-se superior aos valores conhecidos para granitos e mármore, abre-se um potencial para novas aplicações ou exigências.

Com base nos dados obtidos, foi possível caracterizar o conjunto e, à luz das novas informações, estabelecer algumas diferenças e semelhanças entre as rochas avaliadas. Nas rochas de filiação pelítica estudadas, as análises químicas de rocha total mostram semelhanças entre as composições químicas, fato esperado para rochas com origem de sedimentos argilosos e sílticos. Os processos tectônicos e metamórficos que atuaram sobre cada litotipo definiram características próprias de composições mineralógicas e texturas, que se refletem em seu comportamento frente a esforços mecânicos e a processos de alteração. As rochas foliadas avaliadas têm como principais características a anisotropia planar e uma composição

mineralógica rica em filossilicatos. Os resultados dos ensaios realizados para estes materiais comprovaram que as características específicas destas rochas, originadas pela atuação de processos metamórficos distintos, refletem-se em suas propriedades tecnológicas.

Considerando a caracterização tecnológica, entre as rochas pesquisadas há variações internas de valores, mas o conjunto apresenta características próprias que as diferenciam em relação às demais rochas ornamentais, mais especificamente dos granitos e dos mármore. Os estudos realizados revelaram que algumas correlações entre propriedades geomecânicas, existentes para rochas graníticas, não se mantêm nos xistos e folhelhos. Assim, enquanto para os primeiros há um valor médio em torno de 10% para a razão entre a resistência à flexão em relação à resistência à compressão, nas rochas foliadas estudadas essa razão está bem acima desse patamar, com valores entre 20% a 61%. Essas diferenças corroboram a importância e a contribuição desse trabalho para o conhecimento das rochas ornamentais.

As rochas avaliadas destacam-se principalmente pelos elevados valores de resistência à flexão e baixa resistência ao desgaste por abrasão. Usando os granitos como referência, por representarem mais de 50% da movimentação do mercado brasileiro de rochas, nota-se que a resistência à flexão dos xistos peraluminosos é da ordem de três vezes maior que a dos granitos, podendo chegar a quatro vezes. Para o desgaste, a relação é inversa e os xistos podem ter desgastes de até cinco vezes maior. Nessa análise não foi considerado o xisto da região de Passagem de Mariana-MG, pois as amostras coletadas desse material apresentam processo de alteração intempérica mais avançada, fato que compromete os resultados dos testes geomecânicos. Não foram considerados também os resultados do xisto ultramáfico, pois ele apresentou valores de resistência mecânica extremamente baixos, muito distantes daqueles encontrados para os outros xistos avaliados.

O folhelho avaliado nesse trabalho, ou ardósia brasileira conforme sua denominação comercial, é uma rocha de granulação extremamente fina e coloração cinza, caracterizando-se por esse aspecto homogêneo. Tem baixa porosidade e absorção d'água e elevada resistência à flexão. De uso comum no Brasil, predomina sua aplicação em pavimentos internos e externos e em bancadas. Devido à sua facilidade em partir em folhas, predominam produtos não calibrados, que podem requerer um cuidado adicional no momento de aplicação. A ardósia italiana, apresentada entre os exemplos de utilização de material folheado, é uma rocha de granulação fina e aspecto homogêneo, com fissilidade que permite seu deslocamento em placas regulares com espessuras de poucos milímetros (Cortesogno & Mannoni, 1995; Meriana, 1990). Faz parte da cultura da região da Ligúria e está presente em telhados e fachadas de Gênova. Em termos de indicação de uso, tanto o folhelho brasileiro como a

ardósia italiana, com elevada resistência à flexão e à compressão uniaxial, são particularmente adequados a aplicações onde estejam sujeitos a esforços em condições com vãos livres.

O granada-estauroлита-clorita-moscovita-quartzo xisto, que aflora próximo à cidade de Sabará, é uma rocha de granulação fina, com um bandamento milimétrico em tons de cinza. Não são conhecidas aplicações comerciais deste material, mas os resultados de caracterização tecnológica permitem recomendar sua utilização com rocha ornamental. Sua baixa porosidade e absorção d'água e elevadas resistências a esforços de flexão são propriedades favoráveis à sua utilização em bancadas. Essas mesmas propriedades permitem sua aplicação em pisos elevados, mas nesse caso recomenda-se o uso de chapas cortadas perpendiculares à foliação, onde o desgaste por abrasão é menor. No caso de revestimento de fachadas, onde as cargas de compressão e flexão atuam verticalmente, a princípio é recomendável o uso de chapas cortadas perpendicularmente à foliação. Mas como se trata de uma rocha extremamente resistente à flexão e considerando aspectos de serragem das placas, essas podem ser empregadas com o corte paralelo à foliação. Já para elementos estruturais, recomenda-se o uso de peças cortadas perpendicularmente à foliação, mais resistentes, pois a resistência à compressão tem seu maior valor próximo ao limite inferior para rochas silicáticas, proposto por Frazão (2002).

O granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, coletado próximo à localidade de Passagem de Mariana-MG, é uma rocha de granulação fina, com aspecto singular devido à sua coloração cinza a cinza azulada e pela presença de cristais orientados de cianita e/ou de fragmentos líticos. Foi extensamente empregada em muitas edificações históricas do século XVIII, na cidade de Mariana-MG. A avaliação geomecânica feita com amostras com certo grau de alteração comprometeu os valores de resistência. No entanto, a avaliação dos exemplos do séc. XVIII mostrou uma variação do estado de conservação dos elementos elaborados com esse material, desde um estado de deterioração incipiente a severo. Com base no observado, esse litotipo tem potencialidade para uso como rocha ornamental, desde que respeitado, na fase de extração, o critério de seleção de rocha sã.

O albita-carbonato-clorita-quartzo xisto, coletado próximo a Caeté-MG, é uma rocha de coloração cinza esverdeado com bandas mais claras de carbonatos. No exemplo de aplicação de material similar, empregado na Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso, edificação histórica do século XVIII, os elementos internos apresentam poucos sinais de deterioração. Os pilares que sustentam o coro, na entrada na nave, foram cortados subparalelos à foliação da rocha, em peças de 4 m de altura, onde não se observam indícios de deterioração. Para esse litotipo, os valores de resistência à compressão e flexão são menores

que aqueles medidos nos xistos peraluminosos, mas ainda elevados, se comparado com granitos, mesmo quando a carga é aplicada paralela à foliação (Tabela 5.1), como é o caso dos pilares da igreja. As presenças de cristais de Fe-carbonato e de pirita são características a serem consideradas, visto que esses minerais podem se oxidar, quando aplicados em ambiente exposto à umidade.

O cromita-clorita-carbonato-talco xisto, coletado em pedreira na cidade do Serro-MG, é uma rocha cinza clara, cortada por bandas carbonáticas. A caracterização geomecânica dessa rocha, bem como o avançado estado de deterioração dos elementos em cantaria da Chácara do Barão do Serro, onde foram empregado tal litotipo, são informações que devem ser levadas em conta, quando na indicação para seu uso como rocha ornamental. Não se recomenda sua utilização em formas de uso, que requeiram resistência à abrasão ou a esforços de compressão e flexão.

A despeito de suas características geomecânicas e de cunho estético, o granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto e o xisto verde (albita-carbonato-clorita-quartzo xisto), coletados no Quadrilátero Ferrífero, bem como o cromita-clorita-carbonato-talco xisto, coletado na região de Serro, são rochas que têm uma história de uso. Em Minas Gerais são parte integrante da cultura local, sendo que os dois primeiros estão presentes em muitos monumentos do Barroco Mineiro.

Entre os xistos peraluminosos da região do Médio Jequitinhonha, o estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à Araçuaí, é uma rocha cinza, de granulação fina, que tem nódulos milimétricos de quartzo e clorita. Destaca-se por sua elevada resistência à flexão e baixa porosidade e absorção d'água. Assim como o xisto coletado próximo à Sabará, são propriedades que permitem indicar seu uso em bancadas e em revestimentos verticais.

O cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de Itinga, é uma rocha de coloração cinza escura e interessante padrão estético, conferido pela presença de porfiroblastos de andaluzita e cordierita. No conjunto de rochas peraluminosas, é a rocha com menor resistência à flexão, mas com um valor ainda alto, acima dos valores de granitos, adotados como referência neste trabalho (Tabela 5.1). Por sua vez, tem o menor desgaste por abrasão do conjunto, no corte perpendicular à foliação.

Nas avaliações quanto às direções mais adequadas para os cortes das chapas, é necessário considerar que há uma importante propriedade que difere entre os litotipos avaliados: a fissilidade. Assim, o granada-estaurolita-clorita-moscovita-quartzo xisto, coletado próximo a Sabará e o estaurolita-granada-clorita-biotita-quartzo xisto, coletado

próximo a Araçuaí, são rochas com fissilidade pouco pronunciada, devido ao bom embricamento entre os cristais e pela ausência de bandas segregadas de filossilicatos. Esta característica permite maior liberdade da escolha da direção do corte. Já para o folhelho, coletado próximo à cidade de Paraopeba, e o cordierita-andaluzita-moscovita-biotita-quartzo xisto, coletado próximo à cidade de Itinga, ambos com fissilidade pronunciada, o próprio manuseio pode levar ao rompimento das chapas cortadas perpendicularmente à foliação. Para este caso, recomenda-se o corte ou deslocamento segundo os planos de fissilidade.

Uma das características mais atraentes para o uso da rocha ornamental refere-se a sua aparência única, que lhe confere singularidade. Nesse aspecto, os xistos peraluminosos do Jequitinhonha são particularmente interessantes. O primeiro pela presença de nódulos, que lhe conferem um aspecto mosqueado. O segundo, pelo padrão estético dos porfiroblastos. Esse litotipo é um dos poucos exemplos de xisto explotado como rocha ornamental e destina-se principalmente ao mercado internacional.

Para o conjunto de rochas peraluminosas, as condições crescentes de metamorfismo, desde o folhelho da bacia do Bambuí, xistos do Quadrilátero Ferrífero e xistos do Médio Jequitinhonha, refletem-se na composição e na textura, que afetam suas propriedades geomecânicas. O aumento do metamorfismo provocou rearranjos texturais que se refletiram em uma diminuição da porosidade (Spry, 1986) e aumento da resistência à flexão, conforme observado para a sequência do folhelho, xisto de Sabará e xisto de Araçuaí. No entanto, no caso do xisto de Itinga, com grau metamórfico mais alto em relação aos anteriores, essas propriedades geomecânicas apresentam valores piores. O aumento do tamanho médio dos cristais, a recristalização do quartzo com predomínio de contatos retos e a segregação maior entre as bandas de biotita e de quartzo afetaram negativamente a qualidade geomecânica da rocha. A segregação em bandas e os contatos retos favorecem a percolação de água, enquanto que o maior tamanho de grãos está associado à menor resistência aos esforços compressivos e flexão observados (Tabela 5.1). Estudos anteriores para rochas graníticas associam o decréscimo da resistência à compressão uniaxial ao aumento do tamanho médio dos principais minerais constituintes da rocha (Brace, 1961; Onodera & Asoka, 1980; Příkryl, 2001).

O xisto peraluminoso de Itinga, o xisto verde de Caeté e o xisto ultramáfico de Serro são as rochas com a maior porosidade e menor resistência à flexão. A influência da porosidade na resistência à flexão é maior em rochas com tamanho de grão pequeno e baixa porosidade (Brace, 1961), o que corresponde ao caso do conjunto avaliado. Somado a este fato, as rochas apresentam características distintas quanto às relações de contato entre grãos. Nos xistos mais resistentes, predominam contatos curvos a interlobados, que se refletem em

um maior embricamento entre os grãos e consequentemente maior resistência à flexão. A presença do carbonato no xisto verde e no xisto ultramáfico contribui para a diminuição da resistência à compressão e à flexão, devido à clivagem (Onodera & Asoka, 1980).

Considerando os valores obtidos nos ensaios de desgaste por abrasão, os xistos peraluminosos podem ser aplicados como pavimentos, em locais com tráfego fraco (uso privado e limitado). São litotipos com elevada resistência à flexão e a combinação dessas propriedades permite indicar sua aplicação em pisos elevados, mas em zonas de baixo tráfego. Os elevados valores de desgaste por abrasão obtidos nos ensaios realizados com o xisto verde e com o xisto ultramáfico tornam não recomendadas suas aplicações em áreas sujeitas à abrasão. Estes materiais foram historicamente utilizados em passeios públicos das cidades de Caeté e Serro, onde são observados afundamentos pelo atrito dos pés (Item 2.1.4, referente aos exemplos de aplicações).

Na fase de extração, especial atenção deve ser dada ao grau de alteração da rocha, pois um material de baixa qualidade pode, com o tempo e exposição às intempéries, delaminar-se, comprometendo a funcionalidade e aparência da rocha. Nos exemplos avaliados de aplicação do granada-cianita-moscovita-clorita-quartzo xisto, no conjunto arquitetônico da Praça Minas Gerais (Mariana-MG), há situações em que o litotipo encontra-se pouco alterado, como na Casa de Câmara e Cadeia e outras onde, para o mesmo local e forma de uso, um elemento encontra-se mais deteriorado que o outro, embora submetidos às mesmas condições ambientais (Figura 5.2). Assim, a avaliação de um material alterado trouxe como contribuição a importância da observação quanto ao grau de intemperismo do material, no momento de sua extração para fins ornamentais, para garantir que o material extraído da pedreira seja uma rocha sã. Em termos gerais, esta é uma prática comum e corrente no setor de rochas ornamentais, uma vez que a rocha ornamental é um produto e que, portanto, deve atender às exigências de qualidade do mercado.

No caso dos xistos, para os quais foram apresentados exemplos de aplicação em edificações nas cidades de Mariana-MG, Caeté-MG e Serro-MG, foram realizados ensaios de caracterização tecnológica em materiais semelhantes. Os resultados encontrados mostraram-se coerentes com as alterações mapeadas nas edificações históricas. Em termos gerais, as rochas expostas às intempéries e a ações antrópicas desde oitocentos a duzentos anos, encontram-se pouco alteradas. Muitas das modificações observadas não necessariamente implicam em piora das propriedades intrínsecas da rocha e consequente comprometimento de sua capacidade funcional. Constitui uma exceção o xisto ultramáfico empregado na Chácara do Barão do Serro, onde os elementos em cantaria apresentam avançado estado de deterioração. Os

resultados dos ensaios tecnológicos, para material similar àquele empregado na Chácara, indicam que o material é pouco resistente a esforços mecânicos. Somada à forma de utilização inadequada, a localização dos elementos em cantaria, em área externa em um fundo de vale, contribui para a aceleração dos processos de alteração, com oxidação dos minerais, colonização por algas e formação de pátinas. Esse é um exemplo onde a utilização inadequada de um material compromete sua funcionalidade e seu uso em aplicações futuras.

Os litotipos estudados são compostos predominantemente por cristais com tamanhos submilimétricos. A metodologia adotada para a realização de medidas dos parâmetros texturais, por meio de processamento digital de imagens de alta resolução, com fotomicrografias, e imagens de MEV/EDS, capturadas diretamente para o sistema, sem necessidade de conversão de unidades de medida, permitiram medições mais precisas. Medidas realizadas manualmente ou semi-automaticamente constituem prováveis fontes de erro: o tamanho do grão, a quantidade numerosa de cristais a serem medidos e, para alguns casos, a grande variação no tamanho dos minerais, podem levar a medidas enviesadas, que não representam a textura da rocha. A medição automática dos parâmetros geométricos dos grãos, em imagens classificadas, com arquivos individuais para cada fase mineral, constituiu uma base mais confiável para a avaliação dos parâmetros texturais e interpretação de sua influência sobre o comportamento geomecânicos das rochas foliadas.

Os parâmetros petrográficos e geomecânicos avaliados nesse estudo contêm as informações necessárias para indicar as formas mais adequadas de uso das rochas foliadas e permitiram comprovar a sua viabilidade como rochas ornamentais.

Uma vez reconhecida a potencialidade, sugere-se como desdobramento futuro da presente tese, uma investigação de técnicas de beneficiamento e avaliação de mercado para melhor explorar suas possibilidades estéticas, para além de suas propriedades geomecânicas. Os avanços tecnológicos de lavra e beneficiamento possibilitam maior flexibilidade no corte das chapas, de modo a explorar o carácter anisotrópico e assim poder oferecer padrões diferenciados. Outro aspecto com potencial para pesquisa, refere-se às propriedades térmicas das rochas ornamentais. Barbosa (1997) apresentou tese sobre metodologia de especificação e avaliação de desempenho térmico de edificações, com base em materiais empregados no revestimento, onde as ardósias brasileiras foram avaliadas. Figueiredo (2006) avaliou a condutividade térmica de granitos ornamentais. Um estudo sobre as propriedades térmicas em folhelhos e xistos brasileiros, com vistas a aplicações para fins de conforto térmico em edificações, pode agregar valor à rocha e, da mesma forma que os estudos dos aspectos estéticos, favorecer sua aceitação no mercado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIROCHAS-Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. 2008. *O Potencial Chinês para as Exportações Brasileiras no Setor de Rochas Ornamentais*. Informe Abirochas 14/2008, 8 p.
- ABIROCHAS-Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais/CETEM. 2002. *Catálogo de Rochas Ornamentais do Brasil*.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1992. NBR 12042. Materiais Inorgânicos – Determinação do Desgaste por Abrasão. Rio de Janeiro: ABNT, 3 p.
- _____.2010. NBR 15845 Rochas para Revestimento: Métodos de ensaio. Rio de Janeiro. 32 p.
- Aires-Barros L. 2001. *As rochas dos monumentos portugueses. Tipologias e patologias*. Lisboa: Min. Cultura - Inst. Port. Patrim. Arquitetônico, 535 pp.
- Åkesson U., Lindqvist J.E., Göransson M., Stigh J. 2001. Relationship between texture and mechanical properties of granites, central Sweden, by use of image-analysing technique. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **60**: 277-284.
- Alkmim F.F., Brito-Neves B.B., Castro Alves J.A. 1993. Arcabouço Tectônico do Cráton do São Francisco. Uma Revisão. In: Dominguez J.M.L., Misi A., (Eds.), *O Cráton do São Francisco*. Soc. Bras. Geol., Núcleo Bahia/Sergipe, Salvador, p.:45–62.
- Alkmim F.F., Marshak S. 1998. Transamazonian orogeny in the southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90**:29-58.
- Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **7**(4): 349-364.
- Alves B.P. 1966. *Região do Serro, Minas Gerais. Bauxita, níquel e cromo*. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM, Boletim **123**:80-82.
- Arrais J.C.P. 2006. *Caracterização tecnológica das rochas ornamentais dos granitóides porfiróides dos maciços Sorocaba, São Francisco, São Roque, Ibiúna, Piedade e Caucaia, Sudeste do Estado de São Paulo*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 223 p.
- Ávila A., Gontijo J.M.M., Machado R.G. 1979. *Barroco mineiro - glossário de arquitetura e ornamentação*. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro; Rio de Janeiro: Fundação Roberto Marinho. Editora Nacional, 220 pp. il.
- Barbosa M.J. 1997. *Uma metodologia para especificar e avaliar o desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de

- Santa Catarina, 277 p.
- Bizzi L.A., Schobbenhaus C., Vidotti R.M., Gonçalves J. H. - organizadores. 2003. *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil : texto, mapas & SIG* – Brasília : CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 692 pp.
- Bonduá S. 2002. *Nuovi strumenti per la valorizzazione estetica delle rocce ornamentali: simulazione geostatistica e caratterizzazione morfologica - Novos Instrumentos para a valorização estética de rochas ornamentais*. Tesi di dottorato in Georisorse e Geotecnologie. Università di Bologna – Facoltà di Ingegneria Bologna, 234 p.
- Brace W.F. 1961. Dependence of fracture strength of rocks on grain size. *Bulletin of Mineral Industries Experiment Station, Mining Engineering Series. Rock Mech* **76**: 99-103.
- Caldeira A. 1997. *The conservation of Historic Cities and Architectural Heritage in Brazil, with particular reference to the state of Minas Gerais and the city of Mariana*. Ph.D. Thesis, The University of Sheffield, 386 p.
- Casal-Moura A. 2000. *Granitos e rochas similares de Portugal*. Instituto Geológico e Mineiro, Porto, 179 pp.
- Chiodi-Filho C., Rodrigues E. P., Artur A. C. 2003. Ardósias de Minas Gerais: Características Geológicas, Petrográficas e Químicas. *Revista Geociências*, São Paulo, **22**(2):119-127.
- Chiodi-Filho C. 2007. Adequação das rochas brasileiras à marca CE: análise da não conformidade proposta para as telhas de ardósia de Minas Gerais. Disponível em <http://www.ivolution.com.br/news/upload_pdf>. Acessado em 07/11/2009.
- Chiodi-Filho C. 2011. As ardósias Bambuí na marcação CE. Informe ABIROCHAS 04/2011. Disponível em <http://www.abirochas.com.br/news/upload_pdf>. Acessado em 07/09/2011.
- COMIG-Companhia Mineradora de Minas Gerais. 2003. Mapa geológico do estado de Minas Gerais. Escala 1:1.000.000. Belo Horizonte: CPRM/COMIG, Meio Digital.
- Cortesogno L., Mannoni T. 1995. *Ardesia : materia, cultura, futuro*. Genova: Sagep, 205 pp.
- Costa A.G. 1990. Evolução petrológica para uma sequência de rochas metamórficas regionais do tipo baixa pressão, Itinga, NE-MG. *Revista Brasileira de Geociências*, **19**(4):440-448.
- Costa A.G., Campello M.S., Pimenta V.B. 2000. Rochas ornamentais e de revestimentos de Minas Gerais: principais ocorrências, caracterização e aplicações na indústria da construção civil. *Geonomos*, **8**(1): 9-13.
- Costa A.G., Maciel S. L. 2001. Granada-cianita xistos com aplicação ornamental: exemplos da cidade de Mariana, Minas Gerais. In: SBG, Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 11, Belo Horizonte, *Anais*.

- Costa A.G. 2009. *Rochas e Histórias do Patrimônio Cultural do Brasil e de Minas*. Rio de Janeiro: Bem-Te-Vi, 292 pp.
- Costa A.P.L. 2007. *Alterabilidade e caracterização tecnológica dos gnaisses enderbíticos da porção norte do estado do Ceará com aplicação no setor de rochas ornamentais*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 214 p.
- Cukrov N., Alvarenga C.J.S., Uhlein A. 2005. Litofácies da glaciação neoproterozóica nas porções sul do Cráton do São Francisco: exemplos de Jequitaiá (MG) e Cristalina (GO). *Revista Brasileira de Geociências*, **35**(1):69-7.
- Dardenne M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 30, Recife, *Anais*, **2**:597-610.
- Dardenne M.A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz-Filho, A., Campos, D.A. (ed). *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, SBG, p.:231-263.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. 1992. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. London: Pearson Prentice Hall, 696 pp.
- DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. 2005. Sumário Mineral 2005. Disponível em <<http://www.dnpm.gov.br/>>. Acessado em 05/09/2009.
- _____. 2011. Sumário Mineral 2011. Vol.31. Disponível em <<http://www.dnpm.gov.br/>>. Acessado em 19/12/2011.
- Dorr-II J.V.N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *USGS Professional Paper* **641-A**, 110 p.
- Figueiredo E.R.H. 2006. *Condutividade térmica de rochas: uma aplicação para granitos ornamentais*. Dissertação de Mestrado, Pós-graduação em geodinâmica e geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 91 p.
- Ferrari C. 2001. O uso das rochas ornamentais em projetos urbanos e arquitetônicos. In: Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais I, Salvador, *Anais*: 143-145.
- Frazão E.B., Augusto Junior F. 1994. Procedimentos para avaliação da alterabilidade de rochas. In: *Reunião Anual de Pavimentação 28. Anais...*Belo Horizonte, ABPV, **1**:48-84.
- Frazão E.B. 2002. *Tecnologia de Rochas na Construção Civil*. São Paulo: ABGE, 132 pp.
- Gair J.E. 1958. The Sabará Formation. In: *Symposium on Stratigraphy of Minas Series in the Quadrilátero Ferrífero*, Minas Gerais, Brazil. Bol. SBG, **7**(2):68-69.
- Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L. 2004. *Digital Image Processing Using MATLAB*, New Jersey, Pearson Prentice Hall, 249 pp.

- Grossi-Sad J. H., Chiodi-Filho C., Chiodi D.K. 1998. *Panorama do setor de ardósias do Estado de Minas Gerais, Brasil*. Belo Horizonte: Cia. Mineradora de Minas Gerais-COMIG. v. 2, (versão em CD-ROM, 2002).
- Grossi-Sad J.H., Chiodi-Filho C., Chiodi D.K. 2001. Província de ardósia de Minas Gerais. In: C.P. Pinto & M.A. Martins-Neto (eds.) *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*, SBG/Núcleo MG, p.:235-243.
- Gupta A.S., Rao K.S. 2000. Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. *Engineering Geology*, **56**:257–274.
- Hatzor Y.H., Zur A., Mimran Y. 1997. Microstructure effects on microcracking and brittle failure of dolomites. *Tectonophysics*, **281**:141-161.
- Herz N. 1978. Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. *Geol. Surv. Prof. Paper* **641**-C. U.S. Geological Survey, U.S.A., p.:C1–C81.
- Higgins M.D. 2006. *Quantitative textural measurements in igneous and metamorphic petrology*. Cambridge University Press, 275 pp.
- Howarth D. F. , Rowlands J. C. 1986. Development of an Index to Quantify Rock Texture for Qualitative Assessment of Intact Rock Properties. *Geotechnical Testing Journal*, **9**(4): 169-179.
- ICOMOS-ISCS. 2008. *Illustrated glossary on stone deterioration patterns - Glossaire illustre sur les formes d'altération de la pierre English-French version Version Anglais-Français (Monuments and Sites: XV) 2008 78 pages*. Disponível em <http://www.international.icomos.org/publications/monuments_and_sites/15/pdf/Monuments_and_Sites_15_ISCS_Glossary_Stone.pdf>. Acessado em: 20/07/2009.
- IEPHA. 2009. *Igreja Matriz Nossa Senhora do Bonsucesso – Ficha do Bem Cultural*. Disponível em <<http://www.ipac.iepha.mg.gov.br/>>. Acessado em 05/08/2009
- INETI. 2007. *Catálogo de Rochas Ornamentais Portuguesas*. Disponível em <<http://rop.ineti.pt/rop/>>. Acessado em 07/11/2007.
- Jordt-Evangelista H., Alkmim F.F., Marshak S., 1992. Metamorfismo progressivo e a ocorrência dos 3 polimorfos Al₂SiO₅ (cianita, andaluzita e sillimanita) na Formação Sabará em Ibirité, Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista da Escola de Minas, Univ. Federal de Ouro Preto*, **45**:157–160.
- Kasim M., Shakoor A. 1996 An investigation of the relationship between uniaxial compressive strength and degradation for selected rock types. *Engineering Geology*, **44**(1-4):213-227.
- Lima S.A.A., Martins-Neto M.A., Pedrosa-Soares A.C., Cordani U.G., Nutman A. 2002. A

- Formação Salinas na área-tipo, NE de Minas Gerais: uma proposta de revisão da estratigrafia da Faixa Araçuaí com base em evidências sedimentares, metamórficas e de idades U-Pb SHRIMP. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**(4):491-500.
- Lima J.J.C.L. 2002. *Estudo da Dilatação Térmica de Rochas Usadas em Revestimentos de Edificações*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 121 p.
- Lobato L.M., Vieira F.W.R., Ribeiro-Rodrigues L.C., Pereira L.M.M., Menezes M.G., Junqueira P.A., Pereira S.L.M., 1998. Styles of hydrothermal alteration and gold mineralization associated with Nova Lima Group of the Quadrilátero Ferrífero: part I, description of selected gold deposits. *Revista Brasileira de Geociências*, **28**(3):339–354.
- Lobato L.M., Ribeiro-Rodrigues L.C., Vieira F.W.R., 2001a. Brazil's premier gold province. Part II: geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*, **36**:249–277.
- Lobato L.M., Ribeiro-Rodrigues L.C., Costa M.N.S., Martins R., Lehne E., Alves J.V., Tassinari C.C.G., Vieira F.W.R., Biasi E.E., Silva R.C.F.E., Pereira V.C.A., Noce C.M. 2001b. Geologia do Depósito de ouro Cuiabá, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: Jost, H., Brod, J.A., de Queiroz, E.T. (Eds.), *Caracterização de depósitos auríferos em distritos mineiros brasileiros*. Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) and Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira (ADIMB), p.:3–77.
- Maliska A.M. 2004. *Microscopia Eletrônica de Varredura*. Apostila de Curso. UFSC. Departamento de Engenharia Mecânica –Laboratório de materiais. 91 pp.
- Martins-Neto M.A., Alkmim F.F. 2001. Estratigrafia e evolução tectônica das bacias neoproterozóicas do paleocontinente São Francisco e suas margens: Registro da quebra de Rodínia e colagem de Gondwana. In: C.P. Pinto & M.A. Martins-Neto (eds.) *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*, SBG/Núcleo MG, p.:31-54.
- Mathworks. 2010. Disponível em <<http://www.mathworks.com/academia/>>. Acessado em 01/03/2010.
- Mattos I.C. 2005. *Geologia, petrografia, geoquímica, comportamento físico-mecânico e alterabilidade das rochas ornamentais do stock granítico Serra do Barriga, Sobral (CE)*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 260 p.
- Ministério da Cultura-MEC. 2005. *Programa Monumenta. Sítios históricos e conjuntos urbanos de monumentos nacionais: norte, nordeste e centro-oeste*. Brasília : Ministério

- da Cultura, Programa Monumenta: vol. I, cadernos técnicos 3: 456 p.
- Meriana G. 1990. *Fontanabuona - Liguria guide*. Editora Sagep, Genova, 111 p.
- Meyer A.P. 2003. *A Influência da Petrografia no Comportamento Tecnológico de Rochas Ornamentais do Complexo Socorro (SP) e Maciço Pedra Branca (MG)*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 117 p.
- Monteiro E.A., Simões E.J.M., Wardi Junior M., Felipe A.J., Meyer G.L., Nicolau R.A. 2004. *Projeto Cadastro de Abastecimento por Águas Subterrâneas, Estados de Minas Gerais e Bahia: diagnóstico do município de Araçuaí, MG*. Belo Horizonte: CPRM, 14 p.
- Miyashiro A. 1973. *Metamorphism and metamorphic belts*. London: George Allen & Unwin, 492 pp.
- Navarro F.C., Artur A.C., Rodrigues E.P. 1999. Modelos matemáticos na previsão do comportamento do desgaste abrasivo e da resistência à flexão em “granitos” ornamentais, a partir de parâmetros petrográficos. *In: Simp. de Geologia do Sudeste*, n.6, 1999, São Pedro. *Anais....* São Pedro: SBG, p.:142.
- Navarro F.C., Artur A.C. 2002. Caracterização petrográfica como ferramenta para a previsão do comportamento físico e mecânico de granitos ornamentais: uma discussão. *In: III Simpósio Rochas Ornamentais do Nordeste. Anais...* Recife: p:2-9.
- Navarro F.C. 2006. *Influência da petrografia sobre a anisotropia à tensão de compressão e dilatação térmica de rochas ornamentais*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 179 p.
- Noce C.M., Pedrosa-Soares A.C., Grossi-Sad J.H., Baars F.J., Guimarães M.L.V., Mourão M.A.A., Oliveira M.J.R., Roque N.C. 1997. Nova divisão estratigráfica regional do Grupo Macaúbas na Faixa Araçuaí: O registro de uma bacia neoproterozóica. *In: SBG, Simposio de Geologia de Minas Gerais 9, Anais...* **14**:29-31.
- Onodera T.F., Asoka K.H.M. 1980. Relationship between texture and mechanical properties of crystalline rocks. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, **22**:173-177.
- Pedrosa-Soares A.C. & Wiedemann-Leonardos C. 2000. Evolution of the Araçuaí Belt and its connection to the Ribeira Belt, eastern Brazil. *In: CORDANI, U. (ed.). Tectonic Evolution of South America*, p.:265-285.
- Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Wiedemann C.M., Pinto C.P. 2001. The Araçuaí- West-Congo Orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. *Precambrian Research*, **110**: 307-323

- Pinto L.C.M. 1996. *Quantikov- Um analisador microestrutural para o ambiente Windows TM*. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, 161 p.
- Pires F.R.M, Bertolino L.C. 1991. Estudo do metamorfismo nas formações proterozóicas no Quadrilátero Ferrífero, MG. *Anuário do Instituto de Geociências*, **14**:1-9.
- Přikryl R. 2001. Some microstructural aspects of strength variation in rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **38**(5):671-682.
- Přikryl R. 2006. Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients: Limitations and possible source of misinterpretations. *Engineering Geology*. **87**(3-4):149-162.
- Reed S.J.B. 1993. *Electron Microprobe Analysis*. New York, Cambridge University Press, 326 pp.
- Renger F.E., Noce C.M., Romano A.W., Machado N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, **2**:1-11.
- Ribeiro-Rodrigues L.C. 1998. *Gold in Archaen banded ironformation of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil - The Cuiabá Mine*. Ph.D. Thesis, Aachen University of Technology. Augustinus Verlag, Aachener Geowissenschaftliche Beiträge, 264 p.
- Rosière C.A., Chemale-Jr. F. 2000. Brazilian iron formations and their geological setting. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**:274-278.
- Shakoor A, Bonelli R.E. 1991. Relationship between petrographic characteristics, engineering index properties, and mechanical properties of selected sandstone. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, **28**(1):55-71.
- Siegesmund S., Helming K., Kruse R. 1994. Complete texture analysis of a deformed amphibolite — comparison between neutron diffraction and U-stage data. *Journal of Structural Geology*, **16**:131–142.
- Silva F.G. 2007. *Pedra e Cal: os construtores de Vila Rica no século XVIII*. Dissertação de Mestrado, FAFICH, Universidade Federal de Minas Gerais, 207 p.
- Scott T.E, Nielsen K.C. 1991. The effects of porosity on the brittle-ductile transition in sandstones. *Journal of Geophysics Research*, **96**:405-414.
- Spear F.S., 1995. Metamorphic phase equilibria and pressure–temperature–time paths. *Mineralogical Society of America Monograph*, vol. **1**:799 p.
- Spry A. 1986. *Metamorphic Textures*. 2nd ed. Exeter: Pergamon Press, 352 pp.
- Takehara L. 2004. *Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro*

- brasileiros – fração sinter feed*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 419 p.
- Tuğrul A, Zarif I.H. 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology* **51**:303-317.
- Tuğrul A. 2004. The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. *Engineering Geology*, **123** (4):259-372 .
- Uhlein A. 1982. *Geologia e mineralizações de cromita e itabiritos da região de Serro - MG*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 189 p.
- Uhlein A., Dardenne M.A. 1984. Estratigrafia e tectônica da região do Serro, borda leste da Serra do Espinhaço Meridional *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 33, Rio de Janeiro. *Anais*, 5:2282-2301.
- Uhlein A., Chaves M.S.C., Dossin I.A. 1986. Recursos minerais da Serra do Espinhaço Meridional (MG): uma síntese baseada no contexto litoestratigráfico regional. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 34, Goiânia, *Anais*, 5:2453-2464.
- Uhlein A., Lima O.N.B, Fantinel L.M., Baptista M.C. 2004. Estratigrafia e evolução geológica do Grupo Bambui, Minas Gerais (Roteiro Geológico). *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 42, Araxá, *Anais*, CD-Rom (1 vol).
- Villela C.M. 2003. *Artes e ofícios. A cantaria mineira*. Arquitectos, 04.041, Vitruvius. Disponível em <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitectos>>. Acessado em 01/10/2010.
- Yardley B.W.D. 1989. *An Introduction to Metamorphic Petrology*. Harlow: Longman, 248 pp.
- Werneck G. 2008. Serro tem patrimônio histórico revigorado. *Jornal do Commercio* – Rio de Janeiro, 11/02/2008.
- Winkler E.M. 1997. *Stone in architecture: properties, durability*. 3.ed. Berlin: Springer-Verlag, 313 pp.
- Zapparoli A.C. 2001. *Os Depósitos de Cromita da Borda Leste da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais: Petrologia, Quimismo e Implicações Genéticas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 133 p.