UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GEOLOGIA DOS GRANITOS PORFIRÍTICOS DE ILHABELA –
PETROGÊNESE E EVOLUÇÃO CRUSTAL**

Glaucia Silva Barreto

Orientador: Prof. Dr. Caetano Juliani

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica

VERSÃO CORRIGIDA

SÃO PAULO
2016

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do
Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Barreto, Glaucia Silva

Geologia dos granitos porfiríticos de Ilhabela -
petrogênese e evolução crustal. - São Paulo, 2016.

133 p.:il. + anexos + mapas

Dissertação (Mestrado) : IGc/USP

Orient.: Juliani, Caetano

1. Ilhabela: Embasamento precambriano 2.
Domínio costeiro 3. Magmatismo pós-colisional I.
Título

Para minha mãe, minha base nos trilhos instáveis do trem da vida e,

Aos queridos Schorscher e Mikuin, meus grandes professores de geologia e inspirações para vida 😊

*“Voici mon secret. Il est très simple: on ne voit bien qu’avec le coeur. L’essentiel est invisible
pour les yeux”.*

Antoine de Saint-Exupéry, *Le Petit Prince*

No matter what anybody tells you, words and ideas can change the world

Tom Schulman, *Dead Poets Society*

AGRADECIMENTOS

Mikuin, Schorscher e Caetano admiráveis professores, obrigada pela paciência, carinho, sabedoria, confiança, acompanhamento e orientações ao longo do caminho geológico percorrido, grandes sábios das geociências.

Agradeço ao suporte financeiro fornecido pela FAPESP, projeto no. 2012/15462-7: As orogenias neoproterozóicas nos domínios São Roque/Serra do Itaberaba, Embu e Costeiro e a evolução crustal e tectônica do Sudeste do Estado de São Paulo, sob coordenação do Prof. Dr. Caetano Juliani. Bolsa de estudos concedida pela CNPQ e financiamentos para atividades de campo e participação em eventos pela CAPES PROEX – Programa de Geoquímica e Geotectônica da Universidade de São Paulo.

Esta dissertação é resultado da contribuição de muitas pessoas, incluindo alunos e professores desse instituto e de outros para quem eu pedi socorro e estes não hesitaram em ajudar. Orka, obrigada pela ajuda no Arcgis e todas as discussões geológicas ao longo da vida, com você por perto meu mundo fica mais colorido. Fofona e Dira agradeço pelas orientações com tratamento de dados, Carlos por toda e tanta ajuda com o Arcgis, Sinistro por ajudar com tabelas, Iskenta métodos de impressão, Profs. Fátima, Lucelene, Bisteka e Valdecir por conversas sobre granitos, Maria Isabel por compartilhar onde viu granitos na Ilhabela. Minha mãe, por todo o suporte e amor dedicado, obrigada.

Guibs agradeço por emprestar seu computador, revisões de texto, palavras de força com caráter motivador, companhia intelectual virtual e, por todo o acompanhamento ao longo de 8 anos de amor, companheirismo e amadurecimento mútuo.

Ao pessoal que acompanhou em campo Mikuin, Schorscher, Oncinha, Fiona, Indigente, Fidida, Verônica, Brutus, pessoal do Parque Estadual de Ilhabela, muito obrigada pela companhia e suporte físico e mental dedicados.

Agradeço ao Samuca por me ajudar com as amostras e ao Vasco e Kulman no tratamento para datação. Agradeço o apoio técnico das equipes de laboratório, Zé Paulo, Marcos, Leandro, Angélica, Paulinho, pessoal da laminação, os funcionários da Seção de pós-graduação por sempre estarem dispostos a ajudar e esclarecer dúvidas, moças da copa, meninos da audiovisual, meninas da limpeza, manutenção, lanchonete, portaria pela segurança e amizade, pessoas com que tive a oportunidade de conviver e pedir muitos favores.

Todos participantes do 8th Hutton, que estavam sempre muito dispostos a conversar sobre evolução crustal, processos magmáticos e onde eu tive uma supersaturação mental agradabilíssima, recheada com granitos e processos magmáticos.

Meus grandes amigos Beíça, Orka, Oncinha, Iskenta, Dira, Fofona, Sinistro, Scheilinha, Tigresa, Pigs, Bixa, Devassa, muito obrigada pela amizade, pessoal da D-17, Veronica, Pânico e Rejeito, obrigada pela companhia e tolerância. A todos os colombianos que são tão agradáveis de conviver, Santi, Andres, Daniel, Maria Paula, Johanna e Laura. Pessoal da turma de 2015 obrigada pelas perguntas em Geogeral. Obrigada a todos que me ajudaram e cruzaram meu caminho, sempre deixando lembranças agradáveis e palavras de apoio.

Penso nesses dois anos de trabalho intenso realizado no IGc – USP como anos incríveis, onde tive oportunidade crescer e mudar muito, de conviver com pessoas maravilhosas, que muitas vezes nem sabe o quão maravilhosas são. Agradeço todo o aprendizado que vocês puderam me fornecer, de maneira direta ou indireta, aos professores, funcionários e alunos. Espero que as ideias que estão nas páginas seguintes possam ser úteis, sabendo que ainda muito há de ser feito.

RESUMO

Ilhabela, localizada no litoral norte do Estado de São Paulo, está inserida na Província Mantiqueira, no contexto geotectônico da Faixa Ribeira Central (CRB). Em contexto local, Ilhabela e as áreas continentais adjacentes são designadas de Domínio Costeiro.

Ilhabela é um fragmento continental cujo embasamento precambriano é constituído por uma estreita faixa, a oeste, de direção NE (~2 km) de gnaisses migmatíticos milonitizados correlatos aos litotipos do Complexo Costeiro. À leste aflora a unidade mais expressiva do embasamento, representada pelo Batólito Ilhabela. Diques máficos, três stocks alcalinos, gabros estratificados e diques traquíticos são unidades mesozoicas intrusivas nas rochas precambrianas.

A unidade metamórfica é constituída por ortognaisses grossos ricos em veios leucocráticos, com intercalações de biotita gnaisses mesocráticos, gnaisses bandados e rochas calciossilicáticas. Ocorrem ainda lentes de granitos leucocráticos miloníticos e gnaisses leucocráticos. Esses gnaisses apresentam caráter sódico com altos teores de SiO₂, características de rochas do tipo TTG. O terreno gnáissico migmatítico encontra-se intensamente deformado, com foliação milonítica de direção NE mergulho para NW e dobras intrafoliais com flancos rompidos e espessamento de charneira.

O Batólito Ilhabela, intrusivo nas unidades gnáissicas, é representado por granitoides porfiríticos foliados. Foi subdividido em cinco facies graníticas, classificadas como (i) Granodiorito porfirítico com hornblenda, (ii) Granodiorito porfirítico rico em encraves, (iii) Granito porfirítico esverdeado, (iv) Granito porfirítico com granada e (v) Granodiorito com granada rico em fenocristais. Ocorrem ainda, de maneira pouco expressiva, monzonitos, leucogranitos e o Granodiorito Castelhanos.

Similaridades estruturais e petrográficas dos granitos estudados aponta para processos batolíticos de diferenciações com efeitos diferentes em níveis crustais distintos. Com base em dados petrográficos e geoquímicos foi possível identificar três fontes que contribuíram para a construção do Batólito Ilhabela: (i) magmas alcalinos do tipo-A, de possíveis derivações mantélicas, representado pelo Granito porfirítico esverdeado; (ii) magmas derivados de crosta média de tendências cálcio-alcalinas do tipo-I, resultando em granodioritos porfiríticos com hornblenda e; (iii) magmas de crosta superior a média, de tendências peraluminosas do tipo-S, que contribuíram para a geração do Granito porfirítico com granada.

Foliação magmática paralela a subparalela à foliação milonítica regional de direção NE, mergulhos de alto ângulo para NW e zonas de concentração de deformação de estado sólido (com recristalização marginal dos feldspatos e subgrãos de quartzo com padrões de tabuleiro de xadrez) evidenciam o caráter sintectônico dos granitos estudados. Estruturas ígneas bem preservadas e a restrição das zonas miloníticas indicam que o posicionamento do batólito se deu em zonas de baixa deformação, mesmo que de altas temperaturas. Dessa forma, as zonas de cisalhamento seriam facilitadoras para processos de ascensão e mistura de magmas máficos e félsicos dada a dinâmica tectônica que paraleliza as estruturas magmáticas com as metamórficas miloníticas.

Tendências geoquímicas anorogênicas (pós-colisionais) associadas à idade de ~570 Ma para o Batólito Ilhabela estão de acordo com o modelo proposto por Meira (2014), onde, num período entre 600-550 Ma, o Cinturão Ribeira Central estaria passando por descompressão associada a processos de colapso orogénico (colisão Orógeno Brasília – 650-600 Ma).

ABSTRACT

Ilhabela is a scenery island located in the northern coast of São Paulo State, southeastern Brazil, and is included in the Mantiqueira Province, as part of the Central Ribeira Belt (CRB). In a local context, Ilhabela and the adjacent continental areas are designated as Costeiro Domain.

The Ilhabela is a partially detached continental fragment. The western NE-directed narrow belt of gneissic Precambrian basement, parallel to the coast, is represented by variably mylonitized gneisses. The eastern and most expressive basement unit of Ilhabela is composed of granitic intrusions, named Ilhabela Batholith. Mesozoic mafic dikes, three major alkaline syenite stocks, layered gabros and trachyte dikes intruded the Precambrian rocks.

The metamorphic units comprise coarse-grained orthogneisses rich in leucocratic veins, intercalated with mesocratic biotite gneisses, banded gneisses and calc-silicate rocks. Lenses and irregular bodies of leucocratic mylonitic granites and leucocratic gneiss occur within the coarse-grained gneisses. The gneissic terrain is intensively deformed, with mylonitic foliation (NE-striking, NW-dipping structured) and rootless intrafolial folds with thickened hinges. The gneissic rocks show sodic geochemical character with high SiO₂ contents, yielding TTG affinities.

The Ilhabela Batholith is intrusive in the gneissic units. It comprises foliated porphyritic granitoids that can be divided into five granitic facies, represented by (i) hornblende-bearing porphyritic granodiorites, (ii) enclave-rich porphyritic granodiorites, (iii) green porphyritic granites, (iv) garnet-bearing porphyritic granites and (v) phenocryst-rich garnet-bearing granodiorites. Furthermore, restricted occurrences of monzonite, leucogranite and the Castelhanos Granite complete the Precambrian granitic units.

Structural and petrographic similarities indicate batholithic-sized processes with different effects in distinct crustal levels. Based on petrographical and geochemical constraints, at least three different sources can be defined for the petrogenesis of the Ilhabela Batholith: (i) mantle-like A-type alkaline magma (green porphyritic granites and monzonites); (ii) middle to lower crust-like I-type calc alkaline magma (hornblende-bearing porphyritic granodiorite); and (iii) middle to upper crust-like S-type peraluminous magma.

The granitoids magmatic foliation, parallel to subparallel to the host mylonitic foliation (NE-striking and dipping to NW), narrow solid-state deformational zones (with marginal recrystallization of feldspars and chessboard subgrain patterns) suggest syn-tectonic emplacement of the studied rocks. Well-preserved magmatic structures and minor solid-state deformation suggest emplacement in a relatively high-temperature low strain environment. Therefore, the shear zones would facilitate the emplacement and interaction between different sourced magmas.

The ~570 Ma post-collisional anorogenic magmatism of the Ilhabela Batholith is in agreement with a recently proposed tectonic model (Meira, 2014), associated with decompression-related metamorphism occurred between 600-560 in the Central Ribeira Belt. This metamorphic stage would be related to the orogenetic collapse of the collisional orogen (Brasilia orogen) with metamorphic peak between 650-600 Ma.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
CAPÍTULO 1 – APRESENTAÇÃO	17
1.1 Introdução.....	17
1.2 Justificativa da Pesquisa.....	18
1.3 Objetivos	18
1.4 Localização e vias de acesso	18
1.5 Materiais e Métodos	19
1.6 Estrutura da Dissertação	23
CAPÍTULO 2 – TEMÁTICA ABORDADA	25
2.1 Magmatismo Granítico.....	25
2.1.1 Introdução.....	25
2.1.2 Origem, transporte e colocação do magma granítico	25
2.1.3 Evidências de incrementação magmática na crosta superior e inferior - amalgamação de vários pulsos.....	33
2.1.4 Magmatismo e o ambiente tectônico	33
2.2 Referências bibliográficas	39
CAPÍTULO 3 – CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA ESTUDADA	41
3.1. Província Mantiqueira	41
3.1.1.Cinturão Ribeira.....	45
3.2 O Domínio Costeiro na área de estudo.....	49
3.3 Referências Bibliográficas	54
CAPÍTULO 4 – ILHABELA PRECAMBRIAN GEOLOGY, SOUTHEASTERN BRAZIL: TTG-LIKE BASEMENT ROCKS IN THE COSTEIRO DOMAIN	60
Abstract	60
4.1. Introduction	61
4.2. Geological setting.....	62
<i>Coarse-grained gneiss</i>	64
<i>Mesocratic biotite gneisses</i>	64
<i>Banded gneisses</i>	67
<i>Calc-silicate rocks</i>	69
<i>Leucocratic mylonitic granites</i>	69

<i>Leucocratic gneiss</i>	70
4.3 Petrography of the studied samples.....	71
4.4 Main structural features.....	74
4.5 Elemental geochemistry	75
4.6 Discussion and concluding remarks	81
4.7 References	82
CAPÍTULO 5 – MULTIPLE SOURCED POST-COLLISIONAL EDIACARAN MAGMATISM IN THE COSTEIRO DOMAIN, WEST-GONDWANA: AN EXAMPLE FROM ILHABELA BATHOLITH, SOUTHEASTERN BRAZIL	84
ABSTRACT	84
5.1 Introduction	85
5.2 Geological Setting.....	86
5.3 The geology of the Ilhabela Batholith.....	88
<i>Hornblende-bearing porphyritic granodiorite and enclave-rich porphyritic granodiorite</i>	89
<i>Green porphyritic granite</i>	91
<i>Garnet-bearing porphyritic granite</i>	94
<i>Phenocryst-rich garnet-bearing granodiorite</i>	94
<i>Castelhanos granodiorite</i>	97
5.4 Petrography and microstructures of the studied samples	99
5.5 Elemental geochemistry	107
<i>Rare earth and other trace elements</i>	111
<i>Trace elements, tectonic settings and magma sources</i>	112
5.6 U-Pb SHRIMP Zircon Geochronology	114
5.7 Discussions.....	116
<i>Magma interaction processes</i>	116
<i>Crystallization sequence</i>	117
<i>Multiple sourced magmatism</i>	118
<i>Structural discussion</i>	119
5.8 Concluding remarks	119
5.9 References	121
CAPÍTULO 6 – PRINCIPAIS RESULTADOS E CONCLUSÕES	129
Referências:	131

ANEXO I - Mapa geológico de Ilhabela;

ANEXO II - Mapa de pontos;

ANEXO III - Planilha de afloramentos com descrições resumidas dos afloramentos visitados, coordenadas e dados estruturais;

ANEXO IV - Relação de amostras;

ANEXO V - Tabela de amostras laminadas;

ANEXO VI – Tabela de amostras com análise geoquímica e geocronológica;

ANEXO VII – Resumo do pôster exposto no 8th Hutton Symposium on Granites and Related Rocks, intitulado Ilhabela Precambrian geology and crustal evolution, São Paulo State, SE – Brazil;

ANEXO VIII – Resumo submetido ao 48º Congresso Brasileiro de Geologia, intitulado Estruturas e texturas magmáticas e pós-magmáticas em granitos porfiríticos associados à zonas de cisalhamento: exemplos precambrianos da Ilhabela, litoral norte do Estado de São Paulo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Localização da área de estudo, litoral norte do Estado de São Paulo, com principais rodovias de acesso destacadas e disposição das folhas topográficas..... 19

Figura 2.1: Desenho do padrão do perfil da crosta continental com relação temperatura-profundidade de 3 geotermas calculadas por Chapman (1986). Retirado de Wedepohl (1995). 26

Figura 2.2: Diagrama P-T simplificado, representa a quantidade de *melt* (material fundido) gerado durante a fusão de rocha de origem crustal com muscovita e biotita. Retirado de Winter (2001). 27

Figura 2.3: Variação da fração de fusão (vol. %) em função da temperatura para uma gama de rochas crustais típicas. Notar que a porcentagem de *melt* aumenta para todas as rochas com o aumento de temperatura apesar da não linearidade. A área de intervalo entre 20 e 40% de melt indica quantidade de fusão necessária para a produção da maioria das composições graníticas. Retirado de Petford *et al.* (2000). 27

Figura 2.4: Viscosidade do *melt* em função do conteúdo de água para composições tonalíticas e leucograníticas líquidas típicas num pressão fixa de 800 MPa. Linhas horizontais azul e vermelha mostram quantidades de água típica para *melts* naturais. Retirado de Petford (2000). 28

Figura 2.5: Diagrama das taxas de geração vs. extração do magma dividido pelos campos de drenagem e de acumulação. Durante a segregação do magma acompanhada por deformação, a geração de magma é acompanhada pela sua extração (caminho a-d), onde a fração de magma na fonte é menor ou igual a FTP; Por isso, geralmente a crosta continental apresenta-se no fronteira entre material drenado e acumulado ou no campo drenado. Somente quando a fusão é rápida (caminho d-e), ou quando a crosta é submetida somente a compactação gravitacional (caminho a-c) pode se acumular magma o suficiente para que a ascensão ocorra (b-c; e-f). Extraído de Sawyer (1994). 29

Figura 2. 6: Esquema ilustrando diques dúcteis alimentando diques rúpteis-elásticos De Weinberg and Regenauer-Lieb (2010); Retirado de Brown (2013). 31

Figura 2.7: A- Compilação de dados da espessura da intrusão (T), largura (L) e área horizontal (A) (McCaffrey e Cruden, 2002). A curva sólida em S é aproximada de acordo com os dados e a área em

vermelho representa os limites aproximados dos dados. São ilustrados estilos representativos de intrusão adjacentes a partes apropriadas da curva. B- Uma interpretação da curva em S em termos do limite máximo e mínimo crescimento, mecanismo dominante de colocação e profundidade de colocação na crosta (Cruden e McCaffrey, 2002). As flechas indicam trajetórias de crescimento vertical ao longo do crescimento de um possível produto final com um ângulo de $\alpha = \infty$. Retirado de Brown (2013). 32

Figura 3.1: As Províncias Estruturais do Brasil: 1) Rio Branco; 2) Tapajós; 3) São Francisco; 4) Tocantins; 5) Mantiqueira; 6) Borborema; 7) Amazônica; 8) Parnaíba; 9) Paraná; 10) Província Costeira e Margem Continental. Linhas pontilhadas representam limites convencionais das províncias. Extraído de Almeida, F.F.M., *et al.* (1981). 41

Figura 3.2: Mapa tectônico simplificado da Província Mantiqueira e a delimitação dos orógenos e terrenos segundo Silva *et al.* (2005). 43

Figura 3.3: Mapa tectônico do sistema de bacias ediacaranas a cambrianas do sudeste da América do Sul e divisões principais do sul da Província Mantiqueira. Retirado de Almeida R.P. *et al.* (2010). ... 44

Figura 3.4: Mapa geológico regional do Cinturão Ribeira Central, com as principais zonas de cisalhamento indicadas, assim como os domínios. Abreviações: SP: São Paulo; CT: Curitiba. Modificado de Meira *et al.* (2015). 46

Figura 3.5: Mapa tectônico das regiões central e norte do Cinturão Ribeira. 1) Cobertura fanerozóica; 2) Plútons alcalinos do Cretáceo Superior; Cráton do São Francisco; 3) Embasamento arqueano a paleoproterozóico; 4) Cobertura cratônica; 5) Domínio autóctone de metassedimentos de idades mesoproterozóicas a neoproterozóicas; 6) Cinturão Brasília, incluindo a Nappe Socorro (NS); Terrenos do Cinturão Ribeira – Terreno Ocidental: 7) Domínio Andrelândia; 8) Domínio Juiz de Fora; 9) Terreno Paraíba do Sul; 10) Terreno Embu; 11) Arco magmático neoproterozóico; 12) Sucessões metassedimentares neoproterozóicas do Terreno Oriental; 13) Terreno Cabo Frio; 14) Terreno Apiaí. CTB – *Central Tectonic Boundary* (Limite Tectônico Central); CFT – Falha de cavalgamento Cabo Frio; APSZ – Zona de Cisalhamento Além-Paraíba. Retirado de Heilbron *et al.*, 2008. 48

Figura 3.6: Geologia da área de estudo (recorte do Mapa Geológico do Estado de São Paulo – IPT, 1981). 50

Figura 3.7: Mapa Geológico Geral. ZCBA = Zona de Cisalhamento Bairro do Alto; ZCC = Zona de Cisalhamento Camburu; SCSS = Sistema de Cavalgamento São Sebastião; GrPP = Granito Pico do Papagaio; AGJ = Augén Gnaiss Juqueí; CGM = Complexo Gnaissico / Migmatítico; GrGL = Granito Guaecá fácies Leucocrática; GrGB = Granito Guaecá fácies a Biotita; SNC = Sedimentos não Consolidados. Extraído de Maffra (2000). 51

Figure 4.1: Regional geological map of Southern and Central Ribeira Belt, showing the main geological domains and units, major shear zones and Neoproterozoic batholiths and stocks (modified from Meira, 2014). The rectangle shows the location of the Fig. 4.2. Abbreviations – Cities: SP, São Paulo city; CT, Curitiba city. Batholiths: CPB, Cunhaporanga Batholith; TCB, Três Córregos Batholith; AGB, Agudos Grandes Batholith. Cratons (inset): AM, Amazonia Craton; ANG, Angola Block; CO, Congo Craton; KA, Kalahari Craton; LA, Luis Alves Craton; PP, Paranapanema Block; RA, Rio Apa Block; RP, Rio de La Plata Craton; SL, São Luis Craton; WA, West Africa Craton. SR-SI Domain: São Roque-Serra do Itaberaba Domain. 62

Figure 4.2: Geological map of the studied area with location of the presented cross-sections A-A', B-B', C-C' and D-D' (Fig. 4.4)..... 63

Figure 4.3: Coarse-grained gneiss outcrops. a: Oscar beach (TC-17) – Coarse-grained gneiss rich in leucocratic veins concordant to subconcordant to the main mylonitic foliation. b: Oscar beach (TC-17) – rootless intrafolial folds defined by protomylonitic leucocratic veins within coarse-grained. c and d: Curral beach (TC-12) – leucocratic veins with abrupt contact deformed by rootless intrafolial folds. e: Ponta do Portinho (TC-42) – pegmatitic leucocratic veins with diffuse contact crosscutting the deformed leucocratic veins, also defining rootless intrafolial folds. f: Curral beach – pegmatitic leucocratic veins lenticularized within the coarse-grained gneiss..... 65

Figure 4.4: Cross-sections highlighting the lithotypes intercalated with the coarse-grained gneiss. The location of each cross section is shown in the Figure 4.2. Location of sampling points is also shown. A-A': Detailed cross-section of Siriuba beach highlighting the intercalations of mesocratic biotite gneiss within coarse-grained gneiss. Mesozoic basaltic dykes also occur. B-B': Detailed cross-section showing the intercalations of banded gneiss and intrusive features of leucocratic mylonitic granite within the coarse-grained gneiss (Fig. 4.6a). C-C': Detailed cross-section of Curral and Veloso beaches showing the coarse-grained gneiss rich in folded leucocratic veins and intercalations of calc-silicate rocks. D-D': Detailed cross-section of Ponta do Portinho highlighting the intercalations of banded gneiss and boudins of calc-silicate rocks within the coarse-grained gneiss. Mesozoic lamprophyre dykes are also highlighted..... 66

Figure 4.5: Outcrop photos taken from Siriuba beach (TC-07). a: mesocratic biotite gneiss isoclinally folded; b and c: deformed leucocratic veins defining rootless isoclinal intrafolial folds with thickened hinge within mesocratic biotite gneisses; d: one centimeter-thick leucocratic veins deformed by ptygmatic folds..... 67

Figure 4.6: a: TC-58 – abrupt contact between coarse-grained gneisses on the top and banded gneisses below. Note the abundance of thin leucocratic veins, often deformed/stretched; b: detail of a showing deformed leucocratic veins defining rootless intrafolial folds with thickened hinges; c: TC-09 – tectonic intercalation of banded gneisses and leucocratic mylonitic granites, showing subconcordant to discordant leucocratic veins. 68

Figure 4.7: TC-43 – Calc-silicate rocks (1) intercalated with; b: detail of the boudin's neck, surreic folds and the banding of the paragneisses (banded gneisses); c: isoclinal intrafolial folds defined by compositional banding of calc-silicate rocks; d: discontinuous ptygmatic folds of few centimeters-thick leucocratic vein with medium-grained faneritic texture..... 69

Figure 4.8: a: Protomylonitic showing rotated feldspar porphyroclasts enveloped by quartz ribbons and fine-grained quartz/feldspathic-bearing pressure shadows, indication counter-clockwise rotation or top-to-the NE sense of movement (TC-11); b: Intrusive relationship between the mylonitic leucogranite (1) and the banded gneisses (2) (TC-10). 70

Figure 4.9: Ponta do Frade (IL-05) – contact between leucocratic gneisses (1) and hornblende-bearing porphyritic granodiorite (2) (Ilhabela Batholith). a: Irregular apophyses of the granitic material intruding the leucocratic gneiss concordant to the main foliation. Note that the magmatic foliation in the granite is parallel to subparallel to the mylonitic foliation in the host rock; b: detail of the abrupt and sinuous contact between hornblende-bearing porphyritic granodiorites and leucogneisses. Some of the phenocrysts in the granodiorite appear to have been dragged from the leucogneiss (xenocrysts)..... 71

Figure 4.10: Transmitted light photomicrographs of petrological relationships and microstructural features. a: Coarse-grained gneiss foliation defined by aligned hornblende and thin lepidoblastic bands rich in biotite; b: porphyroclasts of K-feldspar with pressure shadow and the presence of films of

quartz between feldspar crystals; c: Pegmatitic veins intruded in the coarse-grained gneisses with quartz ribbons; d: Groundmass of mesocratic biotite gneisses represented by granolepidoblastic texture, with aligned biotite defining the foliation. Note the abundance of plagioclase; e: Banded gneiss marked by intercalations of nematogranoblastic and granoblastic bands; f: Main mineralogy of calc-silicate rocks showing the heterogeneous texture with coarsening on the top of the picture; g: Leucocratic mylonitic granite with a foliated structure and a coarse-grained protomylonitic texture; h: Leucocratic gneiss with subidiomorphic K-feldspar porphyroclast showing myrmekite in the rims. ... 73

Figure 4.11: Equal area stereogram from the Ilhabela gneisses, average orientation of Sn has a dip-direction 308/40. The intrafolial fold axes (Lb) are parallel to subparallel to the stretching lineation (Ls). 74

Figure 4.12: Whole-rock composition of coarse-grained gneiss, leucocratic gneiss, leucocratic mylonitic granite and stretched pegmatitic veins. a: Total alkalis vs. SiO₂ (TAS) diagram, COX *et al.* (1979) modified by Wilson (1989); b: Aluminum saturation index (ASI) vs. Al/(Na+K) diagram, Frost *et al.* (2001); c: Fe* vs. SiO₂ diagram, Frost *et al.* (2001) (Fe*=FeO_t/(FeO_t+MgO)); d: MALI vs. SiO₂ diagram, Frost *et al.* (2001) (MALI = Na₂O+K₂O-CaO); e: chondrite-normalized REE diagram. Normalization values from McDough and Sun (1995). 78

Figure 4.13: Harker diagrams of major elements (% wt) versus SiO₂ (% wt). 80

Figure 4.14: Binary variograms of trace elements versus SiO₂. 80

Figure 5.1: Regional geological map of Southern and Central Ribeira belts showing the major shear zones, main geological units and geological domains. Modified from Meira (2014). Location of Figure 5.2 is indicated by a dashed rectangle. Abbreviations – Cities: SP, São Paulo city; CT, Curitiba city. Batholiths: CPB, Cunhaporanga Batholith; TCB, Três Córregos Batholith; AGB, Agudos Grandes Batholith. Cratons (inset): AM, Amazonia Craton; ANG, Angola Block; CO, Congo Craton; KA, Kalahari Craton; LA, Luis Alves Craton; PP, Parapanema Block; RA, Rio Apa Block; RP, Rio de La Plata Craton; SL, São Luis Craton; WA, West Africa Craton. SR-SI Domain: São Roque-Serra do Itaberaba Domain. 86

Figure 5.2: Geological map of the studied area. See Figure 5.1 for location. 87

Figure 5.3: Outcrop features of hornblende-bearing porphyritic granodiorites a: Porphyritic texture with magmatic foliation defined by aligned K-feldspar phenocrysts (TC-25); b: Oriented 20 cm-thick phenocryst-rich band, parallel to the magmatic foliation (TC-27); c: Boudinated phenocryst-rich band. Note the quartz vein in the boudin neck; d: Anastomosed oriented mafic aggregates (schlieren) in a thin band of high-temperature solid-state foliation (TC-26); e: Elongated dioritic enclave parallel to the magmatic foliation with diffusive contact and interaction features at the edges (TC-25); f: Mingling features between large dioritic body and the granodioritic host rock (TC-27); g: Patchy felsic rock with heterogranular phaneritic texture, bearing hornblende crystals with up to 1 cm-long (TC-54); h: Aplitic quartz-feldspathic vein with abrupt contact with the host rock (TC-25). 91

Figure 5.4: Outcrop features of the hornblende-bearing porphyritic granodiorite with solid-state foliation. a: Protomylonitic texture with sigmoidal K-feldspar porphyroclast showing well developed pressure shadows, suggesting top to SW sense of movement (TC-26); b: Solid-state foliation characterized by sigmoidal K-feldspar porphyroclasts with remaining features of the magmatic foliation (IL-04). 91

Figure 5.5: Outcrop features of the enclave-rich hornblende-bearing porphyritic granodiorite. a: Abundant dioritic enclaves within granodiorites, also showing mingling features (IL-70); b: Garnet aggregates within granodiorite (IL-69). 91

Figure 5.6: Outcrop features of the green porphyritic granite. a: Greenish K-feldspar-rich granite with transitional magmatic foliation to solid-state foliation. The whitish material surrounding the phenocrysts is composed of recrystallized feldspar and quartz grains (IL-92); b: Detail of subhedral greenish mesoperthitic feldspar. Note the occurrence of hornblende, magnetite and pyrite (IL-74); c: 1-2 mm garnet grains included in K-feldspar phenocrysts (IL-89); d: Elongated garnet-bearing leucogranitic enclave parallel to the magmatic foliation (IL-89); e: Mingling structures associated with interaction between two magma types, a main porphyritic perquartzose garnet-bearing granite (1) and other foliated garnet-bearing perquartzose leucocratic granite (2) (IL-90); f: Mesocratic to leucocratic enclave elongated along the magmatic foliation (IL-89); g: Ameboidal-like mesocratic enclave (IL-91); h: felsic bands and fractured irregular mesocratic enclaves (highlighted), surrounded by hornblende-rich bands within the green porphyritic granite (IL-92). 93

Figure 5.7: Outcrops features of garnet-bearing porphyritic granites. a: General aspect of the granite with magmatic foliation and up to 10 cm-long K-feldspar phenocrysts (IL-61); b: Detail of the pinkish K-feldspar phenocryst, groundmass greenish and garnet grains (IL-64); c: Foliated aplitic felsic patches elongated along the magmatic foliation. Arrows point to the xenocrysts captured by the felsic magma (IL-59); d: Restitic folded garnet and biotite-rich schlieren. The fold axial plane is parallel to the magmatic foliation (IL-64). 95

Figure 5.8: Outcrop features of the phenocryst-rich garnet bearing granodiorite unit. a: General aspect of the phenocryst-rich rock, including high density of phenocrysts and abundance of up to 2 cm garnet aggregates (IL-87); b and c: Ameboidal-like mafic enclave with inclusions of K-feldspar xenocrysts (IL-63); d: Elongated mafic enclaves bearing garnet (IL-47); e: Felsic enclave elongated and with foliated structure along the host rock (IL-63); f: Larger felsic enclave elongated along the host rock magmatic foliation (IL-87); g and h: Intrusive relationships of leucocratic veins (1) crosscutting the monzonites (2). Note the xenocrysts migration in h (IL-48). 96

Figure 5.9: Outcrops features from Castelhanos Beach (IL-88). a: General aspects of the foliated mafic enclave-rich porphyritic granodiorite; b: Detail of the magmatic foliation defined by aligned K-feldspar phenocrysts and elongated mafic enclaves c: Most common type of mafic enclave showing saccharoidal texture and elongation following the host rock magmatic foliation; d: Detail of elongated mafic enclave showing diffusive contact with the host rock; e: Larger elongated mafic enclave showing well defined foliation; f: Intrusive leucocratic vein (1) showing diffusive contact with the host rock (2). 98

Figure 5.10: Cross-polarized light photomicrographs of petrological and mineralogical features of the hornblende-bearing porphyritic granodiorite. a: General porphyritic heterogranular coarse-grained texture with part of euhedral orthoclase phenocryst in the right (IL-13); b: Concentric zoning of subeuhedral plagioclase (TC-55); c: Exsolved lamellae in antiperthitic plagioclase (PSM-151A); d: Myrmekitized plagioclase rim in contact with K-feldspar (PSM-151A); e: Detail of subeuhedral mesoperthitic orthoclase rich in plagioclase inclusions with reordered structure from monoclinic to triclinic (microcline), evidenced by tartan twinning at the edges and damaged zones (IL-11); f: Foliation defined by quartz ribbons, aligned mafic aggregates and euhedral K-feldspar phenocryst (IL-05A); g: Solid-state foliation defined by recrystallized subgrains in the edge of the feldspar phenocryst. Note the slightly folded twinning of the plagioclase (IL-04A); h: Heterogranular medium-grained groundmass composed mainly of microcline, quartz ribbons and minor plagioclase and biotite. 101

Figure 5.11: Cross-polarized light photomicrographs of petrological and mineralogical features of the dioritic enclaves. a: General foliated structure and antiperthitic plagioclase phenocryst (PSM-151D); b:

Detail of K-feldspar exsolutions on irregular subeuhedral antiperthitic plagioclase (PSM-151C); c: Pyroxene rimmed by hornblende (PSM-151D); d: Ghost biotite grains associated with hornblende crystals (PSM-151C). The pictures c and d are transmitted light photomicrographs..... 101

Figure 5.12: Cross-polarized light photomicrographs of petrological and mineralogical features of the green porphyritic granite. a: General view of the foliated texture defined by aligned subeuhedral to euhedral K-feldspar and plagioclase phenocrysts. Note the euhedral garnet grains included in K-feldspar (IL-90A); b: Anastomosed magmatic foliation defined by mafic aggregates enveloping larger minerals (IL-77); c: Heterogranular coarse- to medium-grained massive groundmass, mainly composed of quartz, K-feldspar, plagioclase and biotite (IL-91); d: Subeuhedral mesoperthitic orthoclase phenocryst (IL-91); e: Transmitted light photomicrograph of anhedral garnet grain in the groundmass (IL-90A); f: Hornblende rimmed by granular magnetite (opatzation) (IL-91); g: Orthoclase phenocryst and large hornblende rimmed by fine-grained groundmass composed of quartz, plagioclase and K-feldspar (IL-74); h: Foliated mesocratic enclave with subhedral mesoperthitic orthoclase of up to 1.5 cm-long, rimmed by microcline, embedded by aligned heterogranular fine- to medium-grained groundmass. Note the myrmekitized plagioclase in the contact with K-feldspar (IL-89A)..... 104

Figure 5.13: Cross-polarized and transmitted light photomicrographs of petrological and mineralogical features of garnet-bearing porphyritic granite (a-d) and phenocryst-rich garnet-bearing granodiorite (e-h). a: General aspect showing K-feldspar and plagioclase phenocrysts and interstitial quartz ribbons (IL-64A); b: Microclinitization of orthoclase phenocrysts, well-developed in the rims and the damaged zones (IL-64A); c: 2 mm-sized subhedral and anhedral garnet grains associated with biotite (IL-64A); d: anhedral garnet grains from the aluminous enclave (biotite and garnet-rich schlieren) and megacryst of pyroxene (IL-64C); e: Mesoperthitic orthoclase in contact with myrmekitized plagioclase from the groundmass (IL-87A); f: Inclusion-rich garnet grain of up to 1 cm-sized (IL-87A); g: General aspect of mesocratic enclave showing the foliated structure and the presence of pyroxene (IL-87B); h: Brownish and greenish pyroxenes in monzonite (IL-48A). The photomicrographs a, c, d, f and h, and b, e and g were taken with transmitted light and cross-polarized light, respectively. 105

Figure 5.14: Cross-polarized light photomicrographs of petrological and mineralogical features of the Castelhanos granite. a: Aligned subeuhedral mesoperthitic orthoclase phenocryst (IL-88A); b: Subeuhedral antiperthitic plagioclase (IL-88A); c: General foliated structure and the heterogranular fine-grained texture of the dioritic mafic enclave (IL-88B); d: Detail of subeuhedral orthoclase phenocryst rich in plagioclase inclusion and irregular edges, surrounded by the magmatic foliation (IL-88B). .. 106

Figure 5.15: Whole-rock composition of the granitoides from the Ilhabela Batholith and compiled data from Meira (2014). a: Total alkalis vs. SiO₂ (TAS) diagram, Cox *et al.* (1979) modified by Wilson (1989); b: Aluminun saturation index (ASI) vs. Al/(Na+K) diagram, Frost *et al.* (2001); c: Fe* vs. SiO₂ diagram, Frost *et al.* (2001) (Fe*=FeO_t/(FeO_t+MgO)); d: MALI vs. SiO₂ diagram, Frost *et al.* (2001) (MALI=Na₂O+K₂O-CaO); e: SiO₂ vs. K₂O diagram, Peccerillo and Taylor (1975). 110

Figure 5.16: Chemical variation diagrams for major elements using SiO₂ as differentiation index. . 111

Figure 5.17: Chondrite-normalized REE (a,c,d) and silicate earth normalized trace-element (b,e,f) diagrams for the studied rocks. Normalization values from McDonough and Sun (1995). 113

Figure 5.18: Tectonic and source discriminant diagrams. a: R1-R2 tectonic discriminant diagram, Batchelor and Bowden (1985); (b-c) Th/La ratio source discriminant diagrams, Plank (2005); (d-f); Trace element-based source discriminant diagrams, Moreno *et al.* (2014); (g-i): Ce, FeO/MgO and Zr vs 10000*Ga/Al diagrams, Whalen (1987). 114

Figure 5.19: U-Pb SHRIMP zircon geochronology data. a- CL images with spot location and ages of each analyses. b- Concordia plots with SHRIMP data of Hornblende-bearing porphyritic granodiorite (PSM-151B) and Dioritic enclave (PSM-151C) (common Pb corrected)..... 116

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1 – APRESENTAÇÃO

1.1 Introdução

A presente dissertação de mestrado foi realizada entre julho de 2014 e julho de 2016, vinculada ao Programa de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica do Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo. Os trabalhos geológicos realizados nesse período incluíram revisões bibliográficas, estudos de campo, análises petrográficas, geoquímicas e geocronológicas referentes às rochas da região de Ilhabela-SP.

A Ilhabela, localizada no litoral norte do Estado de São Paulo, insere-se no contexto da porção central da Província Mantiqueira (Faixa Ribeira Central), em sua parte mais oriental, o Domínio Costeiro.

Estudos referentes à evolução do terreno precambriano da Ilhabela ainda são escassos, com contribuição pioneira dada por Freitas (1947). Contudo, o trabalho precursor deu maior atenção para as rochas alcalinas aflorantes na Ilhabela e, devido às novas tecnologias e evolução dos conceitos geotectônicos, muitos critérios de classificação precisam ser revistos. Campanha *et al.* (1994) mencionam que o embasamento da Ilhabela é constituído essencialmente por granitoides porfiríticos foliados. Barreto (2012) detalha em dois perfis parte do embasamento da ilha, mas sem o devido aprofundamento ao entendimento dos granitos. Em estudos regionais, Meira (2014) descreve granitos encontrados na Ilhabela, agrupando-os no Batólito Ilhabela. Estudos de detalhe com o intuito de delimitar e descrever as diversas fácies constituintes do batólito, assim como as relações estruturais e petrogenéticas das rochas graníticas com as demais rochas precambrianas são imprescindíveis para o entendimento da evolução geológica do Batólito Ilhabela e, constituem os objetivos centrais deste trabalho.

Este trabalho, portanto, baseou-se no mapeamento geológico do Batólito Ilhabela e na caracterização dos litotipos encontrados, a fim de se entender os processos de evolução crustal ocorridos durante a configuração do supercontinente Gondwana no neoproterozoico.

O Batólito Ilhabela foi subdividido em cinco (5) unidades principais, distribuídas de oeste para leste em: Granodiorito porfirítico com hornblenda (unidade principal); Granodiorito porfirítico rico em encraves máficos; Granito porfirítico esverdeado; Granito porfirítico com granada; e Granodiorito com granada rico em fenocristais. Subordinadamente ocorrem monzonitos, leucogranitos e o Granito Castelhanos.

Foram descritas feições de interação de magmas entre os diferentes litotipos estudados, o que permitiu, baseado adicionalmente nos dados geoquímicos, inferir a evolução petrogenética das rochas do Batólito Ilhabela, reconhecendo distintas fontes para os magmas formadores, desde níveis crustais mais rasos até contribuições mantélicas a crustais profundas. Os dados geocronológicos U-Pb, obtidos via SHRIMP, permitiram ainda a contextualização temporal da colocação do batólito.

1.2 Justificativa da Pesquisa

Apesar da proximidade da cidade de São Paulo, estudos geológicos de detalhe são escassos na região da Serra do Mar, principalmente a respeito das rochas precambrianas. A escassez de trabalhos na região litorânea do Estado de São Paulo é exemplificada pela ausência de mapas geológicos de maior detalhe (o mapa geológico disponível para a região possui escala 1:500.000), a qual inclui a área estudada nessa dissertação. Essa pesquisa é justificada primariamente, portanto, pela confecção de mapa geológico do município de Ilhabela, com ênfase na subdivisão do embasamento precambriano da ilha, o que forneceu o alicerce para os estudos petrogenéticos das rochas precambrianas e interpretação da evolução geológica e tectônica da Ilhabela.

O magmatismo neoproterozoico do Cinturão Ribeira possui ainda relevância científica tanto nas implicações tectônicas durante a configuração do supercontinente Gondwana, quanto em relação aos processos de interação de magmas e evolução crustal desse período.

Adicionalmente, o conhecimento cartográfico e geológico básico da região da Ilhabela possui importância para a divulgação geológica ao público em geral, já que a Ilhabela constitui um reconhecido balneário turístico do litoral paulista. Ademais, os conhecimentos geológicos básicos são imprescindíveis para o planejamento territorial, urbano e estratégico, considerando que o município de Ilhabela comporta em grande parte de seu território o Parque Estadual da Ilhabela.

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho foi o reconhecimento e caracterização geológica, petrográfica, geoquímica e geocronológica dos granitoides de Ilhabela, com o intuito de contribuir ao conhecimento da geologia básica e ao entendimento dos processos petrogenéticos e de evolução crustal da área estudada.

O presente trabalho pretende ainda acrescentar novos dados com a finalidade de caracterizar e testar hipóteses referentes à gênese do magmatismo granítico neoproterozoico do Cinturão Ribeira, contribuindo assim para o melhor entendimento da evolução geológica e tectônica desse segmento do supercontinente Gondwana.

1.4 Localização e vias de acesso

A área de estudo localiza-se no litoral norte do Estado de São Paulo, na região de São Sebastião, no município de Ilhabela. Abrange as folhas em escala 1:50.000 (IBGE) SF.23-Y-D-VI-1 (Caraguatatuba) a norte, SF.23-Y-D-VI-3 (São Sebastião) a sul e SF.23-Y-D-VI-4 (Paranabi) a leste (**Figura 1.1**).

São dois principais acessos, ambos saindo de São Paulo pela Rodovia Ayrton Senna (SP-070) (**Figura 1.1**). O primeiro através da Rodovia SP-098 desde Mogi das Cruzes até Bertiooga, seguindo posteriormente para nordeste pela Rodovia Rio-Santos (BR-101) até São Sebastião. O segundo é pela Rodovia dos Tamoios (SP-099) desde São José dos Campos até Caraguatatuba. A partir daí segue-se para São Sebastião pela BR-101, sentido sul.

Figura 1.1: Localização da área de estudo, litoral norte do Estado de São Paulo, com principais rodovias de acesso destacadas e disposição das folhas topográficas.

1.5 Materiais e Métodos

Para alcançar-se os objetivos propostos nessa dissertação de mestrado foram utilizados os seguintes métodos:

Revisão Bibliográfica

Os estudos bibliográficos foram desenvolvidos com consultas ao acervo da biblioteca IGc-USP e aos sistemas de busca de dados, por meio do Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade de São Paulo (SIBI/USP), incluindo as bases de dados DEDALUS, SciELO, ERL, ProBE e *Web of Science* e pelo Portal CAPES.

Inicialmente a consulta concentrou-se em artigos, dissertações, teses, relatórios e mapas sobre a área de estudo, além de trabalhos de interesse metodológico e temático. Foi realizada extensa pesquisa sobre a formação de magmas graníticos em diferentes ambientes tectônicos. No decorrer da pesquisa, assuntos pertinentes ao tema como granitogênese associada a zonas de cisalhamento e formação de texturas porfiríticas também foram consultados.

Levantamentos em campo

A base deste trabalho está fundamentada no mapeamento geológico da Ilhabela, uma vez que muitas das rochas estudadas não estavam descritas na literatura.

Os levantamentos geológicos de campo contaram, como base, folhas topográficas na escala 1:50.000 (IBGE) SF.23-Y-D-VI-1 (Caraguatatuba), SF.23-Y-D-VI-3 (São Sebastião) e SF.23-Y-D-VI-4 (Paranabi) (**Figura 1.1**). Foram realizadas seções transversais ao longo das drenagens, estradas e trilhas, e ainda caminhamentos ao longo de costões a fim de verificar a continuidade lateral, limitar e caracterizar as heterogeneidades dos litotipos observados.

Os trabalhos de campo foram orientados pelo Prof. Dr. Vinícius Tieppo Meira, sendo realizados em quatro etapas, incluindo levantamentos detalhados e o reconhecimento de novas áreas. Foram sempre realizadas descrições detalhadas de afloramentos, considerando os litotipos, suas estruturas e relações de contato, complementados pela coleta de dados estruturais e amostras para análise

petrográfica. Os dados estruturais foram tratados em estereogramas que possibilitaram análises estruturais locais e comparações regionais.

O mapeamento litoestrutural foi realizado em caminhamentos a pé e, quando possível com suporte veicular, seguindo métodos convencionais, verificando a continuidade lateral das associações litológicas coerentes.

As seções geológicas foram esboçadas durante as atividades de campo e posteriormente refinadas com o progresso dos estudos estruturais e do mapeamento geológico, utilizando como base os mapas topográficos em escala 1:50.000 (IBGE). Os afloramentos estudados foram georreferenciados com o auxílio de um GPS (*Global Positioning System*). O mapa geológico, mapa de pontos e tabela de afloramentos descritos estão apresentados nos **ANEXOS I, II e III**.

Petrografia

Os estudos petrográficos iniciaram-se a partir da revisão dos dados e das coleções de amostras e seções delgadas disponibilizadas pelo grupo de pesquisa.

Posteriormente, com estudos petrográficos mesoscópicos de amostras representativas coletadas em campo, foram selecionadas amostras para análises petrográficas em microscópio ópticos de luz transmitida. Tais análises tiveram como objetivo a caracterização das rochas pela identificação de associações minerais, texturas e microestruturas, incluindo a subdivisão dos principais litotipos e fácies do Batólito Ilhabela e estimativa da sequência de cristalização dos minerais magmáticos. A análise petrográfica orientou ainda a seleção de amostras para os estudos de litogeoquímica e geocronologia.

Os estudos petrográficos foram realizados em microscópios Zeiss Axioplan, no laboratório de Óptica no Departamento de Mineralogia e Geotectônica, com fotomicrografias realizadas no mesmo laboratório.

Análise estrutural

Os dados estruturais coletados em campo estão incluídos na planilha de afloramentos (**ANEXO III**) e foram tratados pelo programa “*Open Stereo*” em projeção equidimensional em hemisfério inferior. Os estereogramas confeccionados possibilitaram análises estruturais de orientação preferencial das principais estruturas e ainda, análises comparativas entre as diferentes rochas expostas na Ilhabela.

Análises estruturais realizadas em campo tiveram como objetivo a caracterização da direção de movimentação, no entanto fazem-se necessários mais estudos, uma vez que as estruturas magmáticas muitas vezes apontam interpretações dúbias, devendo-se realizar análises estatísticas para maior confiabilidade dos diferentes indicadores cinemáticos.

Litogeoquímica

Os estudos geoquímicos em rochas ígneas foram realizados com a finalidade de classifica-las em relação às séries magmáticas e investigar a gênese e evolução através do estudo do comportamento

dos elementos maiores, traço e terras raras, utilizadas como base para interpretações petrogenéticas e geotectônicas.

As 21 amostras analisadas foram selecionadas por critérios litoestratigráficos e petrológicos para análises de rocha total para elementos maiores e traço incluindo os elementos terras raras (ETR), pelos métodos de fluorescência de raios X (FRX) e espectrometria de emissão de massa com fontes de plasma indutivamente acoplados (ICP-MS). Estas 21 amostras representam 9 exemplares da unidade de Granodiorito porfirítico com hornblenda (*Hornblende-bearing porphyritic granodiorite* – HBPG), 4 amostras da unidade de Granito porfirítico esverdeado (*Green porphyritic granite* – GPG), 2 amostras da unidade de Granito porfirítico com granada (*Garnet-bearing porphyritic granite* – GG), 1 amostra de Granodiorito com granada rico em fenocristais (*phenocryst-rich garnet-bearing granodiorite* – PGG), 1 amostra de monzonito (*monzonite*), 1 amostra de leucogranito (*leucogranite*), 1 restito máfico (IL-64C), e 2 encraves mesocráticos incluídos no GPG (IL-89A e IL-92C). Os dados geoquímicos estão apresentados na **tabela 5.1 (Capítulo 5)**.

As amostras foram preparadas no Laboratório de Tratamento de Amostras (LTA) do IGc-USP e o processamento incluiu a lavagem inicial para remoção de eventuais porções alteradas, corte em fatias de ~ 3 cm e/ou fragmentação com martelo em pedaços com dimensões de ~5 cm. A seguir foi utilizada a prensa hidráulica, com pistão de aço para diminuição da granulometria dos fragmentos para dimensões inferiores a 2 mm, e logo após o material foi quarteadado. A pulverização se deu em moinho de panela de anéis de ágata. Foi enviado de 50 a 100g do pó, produzido na fração com tamanho de grão inferior a 200 *mesh*, para o laboratório ACME_ Bureau Veritas Minerals do Canadá, sendo os elementos maiores analisados por Fluorescência de Raios X e menores e traços e terras raras por ICP-MS.

Para cálculo de minerais normativos – CIPW foi utilizado o programa *Norm 3* e a interpretação dos dados foi realizada através de gráficos binários e diagramas classificatórios e discriminantes confeccionados com o auxílio dos *softwares Microsoft Excel 2012* e *GCDKIT 2.3*.

Geocronologia

O método U-Pb em zircão baseia-se na determinação dos isótopos radiogênicos de Pb (^{206}Pb e ^{207}Pb) e seus respectivos isótopos radioativos (^{238}U e ^{235}U). Nesta dissertação foram realizadas datações U-Pb pontuais em zircão, via SHRIMP, com o intuito de determinar as idades de cristalização dos granitoides do Batólito Ilhabela e encraves máficos associados.

A obtenção dos zircões foi realizada no Laboratório de Separação do CPGeo – IGc-USP, sob coordenação do técnico Vasco Antônio P. Loios, abrangendo as seguintes etapas:

Separação Mineral

As amostras foram inicialmente cominuidas com auxílio de marreta, seguida pela passagem no britador secundário de mandíbulas de aço, para obtenção de pedaços com dimensões inferiores a 1 cm. A seguir o material foi passado no moinho de disco para posterior peneiramento em malhas progressivamente menores e as etapas de concentração foram:

- Mesa de Wiffley: consiste na colocação da amostra num funil que a despeja lentamente em pequenas porções em uma mesa vibratória, que possui várias canaletas e uma pequena inclinação lateral. Há constante fluxo d'água que, combinado à vibração da mesa, separa os minerais com significativas diferenças de densidades em recipientes de coleta diferentes, obtendo-se um recipiente com minerais de maiores densidades e outro com minerais de menores densidades.

- Líquidos densos: o material contido no recipiente de minerais pesados foi separado em iodeto de metileno. Quando havia uma quantidade muito grande de material o mesmo era submetido primeiro à separação em bromofórmio.

- Separação Magnética: o zircão é então separado dos demais minerais pesados por separação magnética. Para a realização desta etapa, primeiramente utiliza-se um ímã de mão para a retirada da magnetita. O restante da amostra é colocado em um pequeno funil e submetido a uma corrente inicial muito baixa, próxima de 0 A, com a utilização do Separador Frantz. Dessa maneira os minerais são divididos em magnéticos e não magnéticos e recolhidos. Cada amostra é então submetida a correntes de 1,0, 0,8 e 0,7 A. O zircão é concentrado na fração não magnética.

Catação manual e montagem das pastilhas em resina

Após a etapa de separação mineral obtêm-se os concentrados de minerais pesados e não magnéticos onde se encontra a maior parte dos cristais de zircão. Contudo, esta fração, além de cristais de zircão há também outros minerais, como apatita e alguns sulfetos, sendo necessária a catção manual em lupa Olympus com a utilização de pequenas agulhas para separação dos cristais de zircão. Feito isso, segue-se uma etapa de seleção dos cristais a serem utilizados no estudo. São selecionados cristais de diferentes populações, priorizando os sem fratura, feições de metamictização ou inclusões. Após a seleção de aproximadamente 50 cristais por amostra, estes são capturados com auxílio de uma micropipeta e são colocados numa lamínula. Estes cristais serão capturados com o auxílio de uma agulha fina e dispostos em linha numa fita dupla face.

Após a disposição dos cristais na fita, esta é encaminhada para impregnação de resina Epoxi em moldes redondos de 2,5 cm de diâmetro. Com a resina seca esta seção é polida até que a face dos cristais a serem analisados seja atingida. A seguir, faz-se a metalização com película de carbono para que sejam imageadas (imagens de catodoluminescência – CL) no microscópio eletrônico de varredura – MEV.

As imagens CL e as feições morfológicas dos grãos de zircão guiaram a escolha dos pontos analisados.

As análises U-Pb foram obtidas em microsonda iônica SHRIMP IIe/mc no laboratório CPGeo do IGc-USP. A calibração da concentração de urânio foi obtida com o padrão de referência SL 13 (U: 238 ppm). Razões U-Pb foram calibradas com o zircão de referência TEMORA – 2 (416.78 Ma como idade $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ de referência) (Black *et al.*, 2004) medido a cada quatro novas análises. Os dados foram reduzidos usando SQUID 1.06 e o diagrama concórdia foi obtido utilizando o *software* ISOPLOT (Ludwig, 2009).

Comparação dos granitóides do Batólito Ilhabela com Granitos da Suíte Sintectônica

A comparação entre os granitos foi efetuada em etapas finais do trabalho, com os resultados obtidos dos granitóides do Batólito Ilhabela confrontados com os dados de Meira (2014) dos granitos intrusivos das áreas continentais adjacentes do Domínio Costeiro (Batólito Pico do Papagaio, Leucogranito São Sebastião e representantes do Plúton Ponte Nova-Paraibuna). Diatexitos e neossomas do Complexo Costeiro e ainda dados obtidos do Batólito Ilhabela do *Hornblende-bearing porphyritic granodiorite* e dos encraves dioríticos.

Esta comparação tem como intuito verificar possíveis relações petrogenéticas, com base na contextualização tectônica para se caracterizar os processos de magmatismo granítico neoproterozóicos do Domínio Costeiro.

1.6 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em seis capítulos, os quais incluem três capítulos introdutórios, dois que compõem o corpo principal da tese (Capítulos 4 e 5) e um capítulo final com a integração dos dados obtidos e considerações finais. Os capítulos introdutórios abrangem a apresentação da dissertação (**Capítulo 1**), a exposição de revisões conceituais para discussões abordadas neste trabalho (**Capítulo 2**) e o contexto geológico da área estudada (**Capítulo 3**).

Os dois capítulos seguintes são referente à geologia do embasamento precambriano da Ilhabela dividida em duas partes, ambas redigidas em forma de artigos científicos em língua inglesa, sendo o **Capítulo 4** intitulado “*Ilhabela Precambrian geology, southeastern Brazil: TTG-like basement rocks in the Costeiro Domain*”, apresentando os litotipos gnáissicos e migmatíticos da Ilhabela, com descrições detalhadas dos afloramentos, baseado nos dados obtidos por Barreto (2012). O **Capítulo 5** intitulado “*Multiple sourced post-collisional Ediacaran magmatism in the Costeiro Domain, West-Gondwana: An example from Ilhabela Batholith, southeastern Brazil*” compreende os principais resultados da dissertação, onde são detalhados os litotipos graníticos que compõem o magmatismo pós-colisional ediacarano do Batólito Ilhabela, incluindo análises petrográficas, geoquímicas e geocronológicas.

No **Capítulo 6** são apresentados os principais resultados e as conclusões desta dissertação.

No **ANEXO I** encontra-se o mapa geológico de Ilhabela e perfis, **ANEXO II** o mapa de pontos, **ANEXO III** a planilha de afloramentos com descrições resumidas dos afloramentos visitados, coordenadas e dados estruturais, **ANEXO IV** - relação de amostras que podem ser encontradas em acervo no IGc-USP, **ANEXO V** - tabela de amostras laminadas, que também estão no IGc-USP, **ANEXO VI** – tabela de amostras com análise geoquímica e geocronológica, **ANEXO VII** – Resumo do pôster exposto no 8th *Hutton Symposium on Granites and Related Rocks*, intitulado *Ilhabela Precambrian geology and crustal evolution, São Paulo State, SE – Brazil*; **ANEXO VIII** – Resumo submetido ao 48º Congresso Brasileiro de Geologia, intitulado Estruturas e texturas magmáticas e pós-

magmáticas em granitos porfiríticos associados à zonas de cisalhamento: exemplos precambrianos da Ilhabela, litoral norte do Estado de São Paulo.

As referências bibliográficas utilizadas serão apresentadas ao final de cada capítulo.

CAPÍTULO 6

CAPÍTULO 6 – PRINCIPAIS RESULTADOS E CONCLUSÕES

A principal contribuição deste trabalho foi o mapeamento do terreno precambriano da Ilhabela na escala 1:100.000 (**Anexo I**). A oeste aflora uma estreita faixa de direção NE (~2km) de gnaisses migmatíticos milonitizados correlatos aos litotipos do Complexo Costeiro. À leste, aflora a unidade mais expressiva do embasamento precambriano da ilha e é representada pelo Batólito Ilhabela.

A unidade metamórfica é constituída por ortognaisses grossos ricos em veios leucocráticos, com intercalações de biotita gnaisses mesocráticos, gnaisses bandados e rochas calciossilicáticas. Ocorrem ainda lentes de granitos leucocráticos miloníticos e gnaisses leucocráticos. Esses gnaisses apresentam caráter sódico com altos teores de SiO₂, características de rochas do tipo TTG. O terreno gnáissico migmatítico encontra-se intensamente deformado, com foliação milonítica de direção NE, mergulho para NW e dobras intrafoliais com espessamento de charneira e rompimento dos flancos. (**Capítulo 4**).

O Batólito Ilhabela, intrusivo nas unidades gnáissicas, é constituído por granitoides porfiríticos foliados. Foi subdividido em cinco facies graníticas, representadas por granodioritos porfiríticos com hornblenda, granodioritos porfiríticos ricos em encraves, granitos porfiríticos esverdeados, granitos porfiríticos com granada e granodioritos com granada rico em fenocristais. Ocorrem ainda, de maneira pouco expressiva monzonitos, leucogranitos e o granodiorito Castelhanos (**Capítulo 5**).

Os granitos podem ser classificados como sintectônicos devido a foliação magmática ser paralela a subparalela à foliação metamórfica regional de direção NE e mergulhos para NW, muitas vezes subverticais. O sintectonismo também é constatado por zonas de concentração de deformação de estado sólido, onde é observada recristalização marginal dos feldspatos e subgrãos no padrão tabuleiro de xadrez, ambos indicativos de altas temperaturas. O caráter não penetrativo das zonas miloníticas e preservação de estruturas magmáticas apontam o posicionamento dessa intrusão em zonas de baixa deformação.

Os granitos da Ilhabela são heterogêneos devido às diferenças composicionais e texturais. Encraves máficos são exclusivos dos granodioritos porfiríticos com hornblenda (HBPG). Em geral, os granitos são metaluminosos a fracamente peraluminosos. Os HBPG apresentam tendências calci-alcalinas de alto-potássio bem definidas. Os granitos porfiríticos esverdeados (GPG), com tendências ainda mais alcalinas, constituem derivações mantélicas ou crustais profundas. Os granitos porfiríticos granatíferos (GG) apontam incrementações crustais rasas e os granitos com granada ricos em fenocristais (PGG) se localizam em campos intermediários entre GPG e GG, comumente com maiores afinidades com os GPG, indicando processos de hibridização. Estudos comparativos não excluem a possibilidade de contribuição sedimentar dos materiais provenientes dos litotipos do Complexo Costeiro (diatexitos e neossomas), representados em diagramas spider (**Fig. 5.17**).

As similaridades estruturais e petrográficas dos granitos da ilha apontam para simultaneidade genética, o que é corroborado pelos dados geoquímicos (variações nos teores de SiO₂), o que pode indicar um processo batolítico de diferenciação com efeitos diferentes em níveis crustais distintos.

As zonas de cisalhamento características da região parecem ter servido como facilitador para a ascensão de magmas máficos e félsicos, possivelmente favorecendo processos de mistura (em diferentes proporções de magmas crustais e mantélicos/crosta profunda) dada a dinâmica tectônica, que paraleliza as estruturas magmáticas com as metamórficas miloníticas.

Pelos diagramas discriminantes de Moreno *et al.* (2012, 2014), Whalen (1987) e Pearce (1986), os granitos estudados se localizam nos campos pós-colisionais, com tendências anorogênicas. Volumoso material de origens mantélicas ou crustais profundas representado pelo GPG, e, ainda, a presença de enclaves máficos sugere processo de adelgaçamento crustal, segundo modelos clássicos de complexos de núcleos metamórficos. Tal adelgaçamento ocasiona elevação de isothermas devido a ascensão da astenosfera, fornecendo calor para fusão de rochas de origens sedimentares do Complexo Costeiro.

As tendências geoquímicas pós-colisionais (anorogênicas) associadas à idade de ~570 Ma para o Batólito de Ilhabela, estão de acordo com o modelo proposto por Meira (2014), onde, num período entre 600-550 Ma, o Cinturão Ribeira Central estaria passando por descompressão associada ao colapso do orógeno (colisão Orógeno Brasília e Araçuaí – 650-600 Ma).

Referências:

- Meira, V. T., 2014. Evolução tectono-metamórfica neoproterozóica dos Complexos Embu e Costeiro no contexto de formação do Gondwana Ocidental (leste do estado de São Paulo). Tese de Doutorado, IGc, Universidade de São Paulo. 348 p.
- Moreno, J.A., Montero, P., Abu Anbar, M., Molina, J.F., Scarrow, J.H., Talavera, C., Cambeses, A., Bea, F., 2012. SHRIMP U–Pb zircon dating of the Katerina Ring Complex: insights into the temporal sequence of Ediacaran calc-alkaline to peralkaline magmatism in southern Sinai, Egypt, *Gondwana Research*, 21, 887–900.
- Moreno, J.A., Molina, J.F., Montero, P., Abu Anbar, M., Scarrow, J.H., Cambeses, A., Bea, F., 2014. Unraveling sources of A-type magmas in juvenile continental crust: Constraints from compositionally diverse Ediacaran post-collisional granitoids in the Katerina Ring Complex, southern Sinai, Egypt, *Lithos*, 192–195, 56–85.
- Pearce, J.A., 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes* 19, 120-125.
- Whalen, J.B., Currie, K.L., Chappell, B.W., 1987. A-type granites: geochemical characteristics discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407-419.

Referências bibliográficas

- Almeida, F.F.M., Amaral, G., Cordani, U.G. e Kawashita, K., 1973. The Precambrian evolution of the South American Cratonic Margin South of Amazon River. In: The Ocean Basin and Margins (Nairn e Stelli, Eds.), 1:411-446, Plenum, Nova York.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. In: VIII Simpósio de Geologia do Nordeste, Campina Grande, Atas, SBG, 363–391.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian Structural Provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews* 17, 1–29.
- Almeida, F.F.M., Brito Neves, B. B., Dal Ré Carneiro, Celso, 2000. The Origin and evolution of the South American Platform. *Earth-Science Reviews* 50 (2000) 77–111.
- Almeida, R.P. 2001. Evolução tectono-sedimentar da Formação Santa Bárbara na Sub-bacia Camaquã Ocidental. MS thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Almeida, R.P., 2005. Tectônica e sedimentação do Ediacarano ao Ordoviciano: exemplos do Supergrupo Camaquã (RS) e do Grupo Caacupé (Paraguai Oriental). PhD thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Almeida, R.P., Janikian, L., Fragoso-Cesar, A.R.S., Fambrini, G.L., 2010. The Ediacaran to Cambrian Rift System of Southeastern South America: Tectonic Implications. *The Journal of Geology* 118, 145–161.
- Almeida, R.P., Santos, M.G.M., Fragoso-Cesar, A.R.S., Janikian, L. and Fambrini, G.L., 2012. Recurring extensional and strike-slip tectonics after the Neoproterozoic collisional events in the southern Mantiqueira province, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 84, 347–376.
- Alves, A., 2009. Petrogênese de plútons graníticos do leste paulista: geocronologia, geoquímica elemental e isotópica. Tese de Doutorado - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 122 p.
- Alves, A., Janasi, V.A., Campos Neto, M.C., Heaman, L. and Simonetti, A., 2013. U–Pb geochronology of the granite magmatism in the Embu Terrane: Implications for the evolution of the Central Ribeira Belt, SE Brazil, *Precambrian Research*, 230, 1–12.
- Annen, C., 2011. Implications of incremental emplacement of magma bodies for magma differentiation, thermal aureole dimensions and plutonium-volcanism relationships. *Tectonophysics*, v. 500, p. 3 – 10.
- Barbarin, B., 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, Vol. 46, 605 - 626.

- Barreto, G.S., 2012. Geologia e tectônica da porção oeste da Ilha de São Sebastião, SP e a comparação com as áreas continentais adjacentes. Monografia de Trabalho de Formatura – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 65p.
- Barreto, G.S., Schorscher, J.H.D., Meira, V.T., Juliani, C., 2015. Ilhabela precambrian geology and crustal evolution. 8th Hutton Symposium on Granites and Related Rocks. Abstract books pg 157. Santa Catarina. Brasil.
- Basei, M. A. S.; Siga, O., Jr.; Masquelin, H.; Harara, O. M.; Reis Neto, J. M.; and Preciozzi, F. P. 2000. The Dom Feliciano Belt of Brasil and Uruguay and its foreland domain, the Rio de La Plata Craton: framework, tectonic evolution and correlation with similar provinces of southwestern Africa. In Cordani, U. G.; Milani, E. J.; Thomaz Filho, A.; and Campos, D. A., eds. Tectonic evolution of South America. Rio de Janeiro, 31st Int. Geol. Cong., p. 311–334.
- Basei, M.A.S., Frimmel, H.E., Nutman, A.P., Preciozzi, F., Jacob, J., 2005. A connection between the Neoproterozoic Dom Feliciano (Brazil/Uruguay) and Gariep (Namibia/South Africa) orogenic belts: evidence from a reconnaissance provenance study. *Precambrian Research* 139, 195–221.
- Basei, M.A.S., Frimmel, H.E., Nutman, A.P., Preciozzi, F., 2008. West Gondwana amalgamation based on detrital zircon ages from Neoproterozoic Ribeira and Dom Feliciano belts of South America and comparison with coeval sequences from SW Africa. In: Pankhurst, R.J., Trouw, R.A.J., De Brito Neves, B.B., De Wit, M.J. (Eds.). *West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*, London. Geological Society, London, Special Publication 294, 239–256.
- Basei, M.A.S., Brito Neves, B.B., Siga Jr, O., Babinski, M., Pimentel M.M., Tassinari, C.C.G., Hollanda, M.H.B., Nutman, A., Cordani, U.G., 2010. Contribution of SHRIMP U–Pb zircon geochronology to unravelling the evolution of Brazilian Neoproterozoic fold belts. *Precambrian Research* 183, 112–144.
- Batchelor, R.A. and Bowden, P., 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters, *Chemical Geology*, 48, 43–55.
- Bea, F., Montero, P., Molina, J.F., 1999. Mafic precursors, peraluminous granitoids, and late lamprophyres in the Avila batholith: a model for the generation of Variscan batholiths in Iberia, *Journal of Geology*, 107, 399–419.
- Bitencourt, M.F., 1996. Granitóides sintectônicos da região de Porto Belo, SC: uma abordagem petrológica e estrutural do magmatismo em zonas de cisalhamento. Tese de doutoramento, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 310 pp.
- Black, L. P., Kamo, S. L., Allen, C. M., Davis, D. W., Alenikoff, J. N., Valley, J. W., Mundif, R., Campbell, I. H., Korsch, R. J., Williams, I. S., Foudoulis C., 2004. Improved

- $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of trace element related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. *Chemical Geology*, 205(1), 115-140.
- Brito Neves, B.B. e Cordani, U.G., 1991. Tectonic evolution of South America during Late Proterozoic. *Precambrian Research* 33, 23–40.
- Bons, P.D., Dougherty-Page, J., and Elburg, M.A., 2001. Stepwise accumulation and ascent of magmas: *Journal of Metamorphic Geology*, v. 19, p. 627–633.
- Brown, M., 2013. Granite: From genesis to emplacement. *Geological Society of America Bulletin*; Vol. 125, no. 7-8; pp. 1079-1113.
- Brown, M., 2004. Melt extraction from lower continental crust: *Transactions of the Royal Society of Edinburgh–Earth Sciences*, v. 95, p. 35–48.
- Brown, M., and Solar, G.S., 1998a, Shear zone systems and melts: Feedback relations and self-organization in orogenic belts: *Journal of Structural Geology*, v. 20, p. 211–227.
- Campanha, G.A.C. e Ens, H.H., Ponçano, W.L., 1994. Análise morfotectônica do Planalto Juqueriquerê, São Sebastião. *Revista Brasileira de Geociências* 24 (1), 32–42.
- Campanha, G.A.C., Ens, H.H., 1996. Estruturação geológica da região da Serra do Juqueriquerê, São Sebastião, SP. *Boletim TG – Instituto de Geociências USP* 27, 41-49.
- Campanha, G.A.C. e Sadowski, G.D., 1999. Tectonics of the southern portion of the Ribeira Belt (Apiá Domain). *Precambrian Research* 98, 31–51.
- Campanha, G.A.C. e Brito Neves, B.B., 2004. Frontal and oblique tectonics in the Brazilian shield. *Episodes* 27, 255–259.
- Campanha, G.A.C., Basei, M.A.S., Tassinari, C.C.G., Nutman, A.P., Faleiros, F.M., 2008. Constraining the age of the Iporanga Formation with SHRIMP U–Pb zircon: implications for possible Ediacaran glaciation in the Ribeira Belt, SE Brazil. *Gondwana Research* 13, 117–125.
- Campos Neto, M.C. e Figueiredo, M.C.H., 1995. The Rio Doce Orogeny, Southeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 8, 143–162.
- Campos Neto, M.C., 2000. Orogenic systems from Southwestern Gondwana: an approach to Brasiliano–Pan African Cycle and orogenic collage in Southeastern Brazil. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.). *Tectonic Evolution of South America*, 335–368.
- Campos Neto, M.C., Basei, M.A.S., Vlach, S.R.F., Caby, R., Szabó, G.A.J., Vasconcelos, P., 2004. Migração de Orógenos e Superposição de Orogêneses: um esboço da colagem brasileira no Sul do Cráton do São Francisco, SE - Brasil. *Geologia USP – Série Científica* 4, 13–40.

- Cordani, U.G., Coutinho, J.M.V., Nutman, A.P., 2002. Geochronological constraints on the evolution of the Embu Complex, São Paulo, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 14, 903–910.
- Debon, F. and Lemmert, M., 1999. Evolution of Mg/Fe Ratios in Late Variscan Plutonic Rocks from the External Crystalline Massifs of the Alps (France, Italy, Switzerland), *Journal of Petrology*, 40, 1151–1185
- Dias Neto, C. M., 2001. Evolução tectono-termal do Complexo Costeiro (Faixa de Dobramentos Ribeira) em São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências – USP, 160p.
- Ebert, H., 1971. O Paraibides entre São João del Rei, Minas Gerais e Itapira, São Paulo, e a bifurcação entre Paraibides e Araxaides. *Bol. Esp.*, 1:177-178, Soc. Bras. Geol. São Paulo.
- Fernandes, A.J., 1991. Complexo Embu no leste do Estado de São Paulo: contribuição ao conhecimento da litoestratigrafia e da evolução estrutural e metamórfica. 1991. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.
- Floribal, L.M., 2011. Petrogênese de granitos sintectônicos em ambiente pós-colisional do escudo catarinense: estudo integrado de geologia estrutural, geoquímica elementar e isotópica Sr-Nd-Pb e geocronologia U-Pb em zircão. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 153 p.
- Floribal, L.M., Bitencourt, M.F., Janasi, V.A., Nardi, L.V.S., Heaman, L.M., 2012. Petrogenesis of syntectonic granites emplaced at the transition from thrusting to transcurrent tectonics in post-collisional setting: Whole-rock and Sr–Nd–Pb isotope geochemistry in the Neoproterozoic Quatro Ilhas and Mariscal Granites, Southern Brazil. *Lithos*, v. 153, p 53 – 71.
- Fragoso Cesar, A.R.S., 1980. O Cráton Rio de La Plata e o Cinturão Dom Feliciano no Escudo Uruguaio-Sul-Riograndense. In: XXXI Congresso Brasileiro de Geologia, Anais 5. Camboriú, SBG, 2879–2892.
- Fragoso-Cesar, A.R.S., 1991. Tectônica de Placas no Ciclo Brasileiro: as orogenias dos Cinturões Dom Feliciano e Ribeira no Rio Grande do Sul. PhD thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Fragoso Cesar, A.R.S., 1993. As placas brasileiras do sul e sudeste da Plataforma Sul-Americana. Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 4. Belo Horizonte, 1993. Atas. Belo Horizonte, SBG, 183-188.
- Fragoso-Cesar, A.R.S.; Fambrini, G.L.; Almeida, R.P.; Pelosi, A.P.M.R.; Janikian, L.; Riccomini, C.; Machado, R.; Nogueira, A.C.R.; and Saes, G.S., 2000. The Camaquã

- extensional basin: Neoproterozoic to Early Cambrian sequences in southernmost Brazil. *Rev. Bras. Geocienc.* 30: 438–441.
- Fragoso-Cesar, A.R. S.; Fambrini, G.L.; Riccomini, C.; Janikian, L.; Almeida, R.P.; Pelosi, A.P.M.R.; and Machado, R., 2001. Estruturas induzidas por abalos sísmicos na Formação Santa Bárbara (Neoproterozóico III-Eocambriano), Bacia do Camaquã, RS: o exemplo do Passo da Capela. *Rev. Bras. Geocienc.* 31: 155–162.
- Fragoso-Cesar, A.R.S., 2008. Novas Considerações sobre o Ciclo Brasileiro. In 44 Congresso Brasileiro de Geologia, Anais. Curitiba, SBG, p. 28.
- Frost, R.B., Barnes, C.G., Collins, W.J., Arculus, R.J., Ellis, D.J. and Frost, C.D., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks, *Journal of Petrology*, 42(11), 2033–2048.
- Freitas, R.O., 1947. Geologia e petrologia da Ilha de São Sebastião. F.F.C.L. (Fac. Fil., Ci. e Letras), USP., Bol. 85: 244 p., 1 mapa (Geologia 3), São Paulo.
- Fuck, R.A., Brito Neves, B.B., Schobbenhaus, C., 2008. Rodinia descendentes in South America. *Precambrian Research* 160, 108–126.
- Garda, G.M., 1995. Os Diques Básicos e Ultrabásicos entre as cidades de São Sebastião e Ubatuba, Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Vol. 1 (texto): 156 pp., Vol. 2 (anexos): 24 tabelas, IG-USP, São Paulo.
- Garda, G.M., Schorscher, H.D., Esperança, S., Carlson, R.W., 1995. The Petrology and geochemistry of coastal dikes from São Paulo State, Brazil: implications for variable lithospheric contributions to alkaline magmas from the western margin of the South Atlantic. In: ISUM, Extended Abstracts: 106-107, CPRM/FAPESP, São Paulo.
- Gualda, G.A.R. and Vlach, S.R.F., 2007b. The Serra da Graciosa A-type Granites & Syenites, southern Brazil. Part 2: Petrographic and mineralogical evolution of the alkaline and aluminous associations, *Lithos*, 93, 310–327.
- Hackspacher, P.C., Dantas, E.L., Spoladore, A., Fetter, A.H. and Oliveira, M.A.F., 2000. Evidence of neoproterozoic backarc basin development in the Central Ribeira Belt, southeastern Brazil: Geochronological and geochemical constraints from the São Roque – Açungui Groups. *Revista Brasileira de Geociências*. 30 (1): 110-114. 2000.
- Harris, N.B.W., Pearce, A.J., Tindle, A.G., 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward, M.P., Ries, A.C. (Eds.). *Collision Tectonics*. Geol. Soc. Am. Spec. Papers 10, 115-158p.
- Hasui, Y., Carneiro, C.D.R., Coimbra, A.M., 1975. The Ribeira Folded Belt. *Revista Brasileira de Geociências* 5, 257–266.
- Hasui, Y. e Sadowski, G.R., 1976. Evolução geológica do Pré-Cambriano na região sudeste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências* 6 (3), 182–200.

- Hasui, Y., Fonseca, M.J.G., Ramalho, R., 1984. A parte central da Região de Dobramentos Sudeste e o Maciço Mediano de Guaxupé. Cap. 7: 307-328, In: C. Schobbenhaus *et al.* (coord.): Geologia do Brasil, 501 pp., D.N.P.M.-D.G.M., Brasília.
- Hasui, Y. e Oliveira, M.A.D., 1984. Província Mantiqueira – Setor Central. In: ALMEIDA, F.F.M. e HASUI, Y. (Eds.) O Precambriano do Brasil, 308-344.
- Hennies, W.T. e Hasui, Y., 1968. Geocronologia das rochas eruptivas da Ilha de São Sebastião, SP. In: 22º Cong. Bras. Geol., Atas. 145-148, SBG, Belo Horizonte.
- Heilbron, M. e Machado, N., 2003. Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic–Eopaleozoic Ribeira belt, SE Brazil. *Precambrian Research* 125, 87–112.
- Heilbron, M., Pedrosa-Soares, A.C., Campos Neto, M., Silva, L.C., Trouw, R.A.J., Janasi, V.C., 2004. A Província Mantiqueira. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito Neves, B.B., 2004. Geologia do Continente Sul-Americano, evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Cap. XIII, Província Mantiqueira, 203–234.
- Heilbron, M., Valeriano, C.M., Tassinari, C.C.G., Almeida, J. Tupinamba, M., Siga Jr., O. e Trouw, R., 2008. Correlation of Neoproterozoic terranes between the Ribeira Belt, SE Brazil and its African counterpart: comparative tectonic evolution and open questions. *Geological Society, London, Special Publications*, 294, 211–237.
- Hibbard, M.J., 1987. Deformation of incompletely crystallized magma systems: granitic gneisses and their tectonic implications. *The Journal of Geology*, 95, no.4, pp.543-561.
- Higgins, M.D., 1999. Origin of megacrysts in granitoids by textural coarsening: a crystal size distribution (CSD) study of microcline in Cathedral Peak Granodiorite, Sierra Nevada, California. *Geological Society, London. Special Publications*, v. 168, p. 207 – 209.
- IPT, 1981. Mapa Geológico do Estado de São Paulo, 1:500.000. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), nota explicativa.
- Janasi, V.A., and Ulbrich, H.H.G.J., 1991. Late Proterozoic granitoid magmatism in the State of São Paulo, Southeastern Brazil, *Precambrian Research*, 51, 351–374.
- Janasi, V.A., Vlach, S.R.F., Campos Neto, M.C. and Ulbrich, H.H.G.J., 2009. Associated A-type subalkaline and high-K calc-alkaline granites in the Itu Granite Province, southeastern Brazil: Petrological and Tectonic significance, *The Canadian Mineralogist*, 47, 1505–1526.
- Janasi, V.A., Leite, R.J., Van Schmus, W.R., 2001. U-Pb chronostratigraphy of the granitic magmatism in the Agudos Grandes Batholith (West of São Paulo, Brazil) - implications for the evolution of the Ribeira Belt. *Journal of South American Earth Sciences* 14, 363–376.
- Juliani, C., Beljavskis, P., 1995. Revisão da litoestratigrafia da Faixa São Roque/Serrado Itaberaba (SP). Ver. IG. São Paulo, 16 (1/2), 33-58.

- Juliani, C., Hackspacher, P., Dantas, E.L., Fetter, A.H., 2000. The mesoproterozoic volcanosedimentary Serra do Itaberaba Group of the Central Ribeira Belt, São Paulo State, Brazil: implications for the age of the overlying São Roque Group. *Revista Brasileira de Geociências* 30, 82–86.
- Liégeois, J.P., 1998. Some words on the post-collisional magmatism. Preface to Special Edition on Post-Collisional Magmatism. *Lithos* 45, xv-xvii.
- Lima, G.A., 2001. Gabros Estratiformes Da Região Norte da Ilha de São Sebastião, SP. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências – USP, 170 pp.
- Lima, G.A. e Schoscher, J.H.D., 1999. Complexo gábrico estratiforme da Ponta da Pacuíba – Ilha de São Sebastião. VI Simpósio de Geologia do Sudeste. São Pedro. SP, Boletim de Resumos, pp. 65.
- Ludwig, K., 2009. SQUID 2: A User's Manual, rev. 12 Apr, 2009. Berkeley Geochronology Center, Special Publication 5, 110 p
- Machado, R., and Sayeg, H.S. 1992. Aplicação da análise geométrica e cinemática nos falhamentos que condicionaram a bacia molássica do Arroio Boici, RS. In I Workshop Sobre as Bacias Molássicas Brasileiras, Boletim de Resumos Expandidos. São Leopoldo, SBG/UNISINOS, p. 73–76.
- McDonough, W.F., and Sun, S.S., 1995. The composition of the Earth, *Chemical Geology*, 120, 223–253.
- Macluf, S. and Schorscher, J.H.D., 2001. Petrogênese das rochas charnockíticas e aplitos intrusivos do Complexo Charnockítico e Ubatuba, SP. In: Simpósio de Geologia do Sudeste 7, Rio de Janeiro. Boletim de Resumos, 46.
- Maffra, C.Q.T., 2000. Geologia estrutural do embasamento cristalino na região de São Sebastião, SP: evidências de um domínio transpressivo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências – USP, 113p.
- Meira, V.T., 2014. Evolução tectono-metamórfica neoproterozóica dos Complexos Embu e Costeiro no contexto de formação do Gondwana Ocidental (leste do estado de São Paulo). Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 348 p.
- Meira, V.T., Juliani, C., Schorscher, J.H.D., García-Casco, A., Hyppolito, T., 2014. Does the Pico do Papagaio indeed represent a Neoproterozoic Magmatic Arc? 9th SSAGL. Abstract book p. 193.
- Meira, V.T., García-Casco, A., Juliani, C., Almeida, R.P., Schorscher, J.H.D., 2015. The role of intracontinental deformation in supercontinente assembly: insights from the Ribeira Belt, Southeastern Brazil (Neoproterozoic West Gondwana). *Terra Nova*, 27, 206-217.

- Menand, T., 2009. The emplacement and growth of igneous bodies: what are the physical controls and how are emplacement depths determined? *Tectonophysics*, v. 500, p 11 – 19.
- Miller, R.B. and Paterson, S.R., 1999. In defense of magmatic diapirs: *Journal of Structural Geology*, v. 21, p. 1161–1173.
- Miller, C.F., Furbish, D.J., Walker, B.A., Claiborne, L.L., Koteas, G.C., Bleick, H.A., Miler, J.S., 2011. Growth of plutons by incremental emplacement of sheets in crystal-rich host: Evidence from Miocene intrusions of the Colorado River region, Nevada, USA, *Tectonophysics*, 500, 65–77.
- Moreno, J.A., Montero, P., Abu Anbar, M., Molina, J.F., Scarrow, J.H., Talavera, C., Cambeses, A., Bea, F., 2012. SHRIMP U–Pb zircon dating of the Katerina Ring Complex: insights into the temporal sequence of Ediacaran calc-alkaline to peralkaline magmatism in southern Sinai, Egypt, *Gondwana Research*, 21, 887–900.
- Moreno, J.A., Molina, J.F., Montero, P., Abu Anbar, M., Scarrow, J.H., Cambeses, A., Bea, F., 2014. Unraveling sources of A-type magmas in juvenile continental crust: Constraints from compositionally diverse Ediacaran post-collisional granitoids in the Katerina Ring Complex, southern Sinai, Egypt, *Lithos*, 192–195, 56–85.
- Oliveira, J.M.M.T., and Fernandes, L.A.D., 1991. Estágios finais da evolução do Cinturão Dom Feliciano: tectônica e sedimentação da Formação Arroio dos Nobres. In III Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, Boletim de Resumos Extensos. Rio Claro, SBG, p. 58–59.
- Paterson, S.R., Vernon, R.H., 1995. Bursting the bubble of ballooning plutons; a return to nested diapirs emplaced by multiple processes. *Geological Society of America Bulletin* 107, 1356–1380.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. e Tindle, A. G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of petrology*, Vol. 25, 956 – 983.
- Pearce, J.A., 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes* 19 (4), 120-125.
- Petford, N., Cruden, A.R., McCaffrey, K.J.W. e Virgneresse, J.L., 2000. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. *Nature*, Vol. 408, pp. 669 – 673.
- Philipp, R.P. e Machado, R., 2005. The Late Neoproterozoic granitoid magmatism of the Pelotas Batholith, southern Brazil. *J. S. Am. Earth Sci.* 19: 461–478.
- Philpotts, A. R., 1990. Principles of Igneous and metamorphic petrology. Princeton University Press. 552p.
- Plank, T., 2005. Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents. *Journal of Petrology*, v. 46, n. 5, 921-944p.

- Reiner, N., 1993. Contribuição à petrologia das rochas charnockíticas de Ubatuba, leste do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 86p.
- Rollinson, H., 1994. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific & Technical. 352 pp.
- Sawyer, E.W., 1994. *Melt segregation in the continental crust*. Geological Society of America. Vol. 22. Pp. 1019 – 1022.
- Sato, K., Tassianri, C.C.G., Basei, M.A.S., Siga-Júnior, O., Onoe, a.T. and Souza, M.D., 2014. Sensitive High Resolution Ion Microprobe (SHRIMP IIe/MC) of the Institute of Geosciences of the University of São Paulo, Brazil: analytical method and first results. *Revista do Instituto de Geociências – USP, Série Científica*, v.14, n.3, p3-18. DOI: 10.5327/Z1519-874X201400030001
- Scarrow, J.H., Molina, J.F., Bea, F., Montero, P., 2009. Within-plate calc-alkaline rocks: Insights from alkaline mafic magma–peraluminous crustal melt hybrid appinites of the Central Iberian Variscan continental collision, *Lithos*, 110, 50–64.
- Schobbenhaus, C. e Campos, D.A., 1984. A evolução da plataforma Sul-Americana no Brasil e suas principais concentrações minerais. Cap. 1: 9-53, In: C. Schobbenhaus *et al.*(coord.): *Geologia do Brasil*, 501 pp., D.N.P.M.-D.G.M., Brasília.
- Shand, S. J., 1927. *Eruptive rocks*. London: Thomas Murby. 488p.
- Silva, A.T.S.F., Chiodi Filho, C., Chiodi, D.K., Pinto Filho, W.D., 1977. Projeto Santos-Iguape. Vol. 1: *Geologia*, 639 pp., Convênio DNPM-CPRM, São Paulo.
- Silva L.C., McNaughtonb, N.J., Armstrong, R., Hartmann, L.A., Fletcherb, I. R., 2005 The neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections: a zircon-based U–Pb geochronologic subdivision for the Brasiliano/Pan-African systems of orogens. *Precambrian Research* v.136 – 203-240.
- Sommer, C.A.; Lima, E. F.; Nardi, L. V. S.; Liz, J. D.; and Waichel, B. L., 2006. The evolution of Neoproterozoic magmatism in southernmost Brazil: shoshonitic, high-K tholeiitic and silica-saturated, sodic alkaline volcanism in post-collisional basins. *An. Acad. Bras. Cienc.* 78:573–589.
- Trouw, R.A.J., Heilbron, M., Ribeiro, A., Paciullo, F.V.P., Valeriano, C.M., Almeida, J.C.H., Tupinambá, M., Andreis, R.R., 2000. The central segment of the Ribeira Belt. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (Eds.). *Tectonic Evolution of South America*, 287–310.
- Wedepohl, K.H., 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 59, No. 7, pp. 1217 – 1232.

- Wiebe, R.A. e Collins, W.J., 1998. Depositional features and stratigraphic sections in granitic plutons: implications for the emplacement and crystallization of granitic magma. *Journal of Structural Geology* 20: 1273–1289.
- Whalen, J.B., Currie, K.L., Chappell, B.W., 1987. A-type granites: geochemical characteristics discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407-419.
- Wiebe, R.A. e Collins, W.J., 1998. Depositional features and stratigraphic sections in granitic plutons: implications for the emplacement and crystallization of granitic magma. *Journal of Structural Geology* 20: 1273–1289.
- White, A.J.R., Chappel, B.W., 1983. Granitoid types and their distribution in the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. *Geological Society America Memoir* 159, 21-34.
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis*. London: Unwin Hyman, 466p.
- Winter, JD, 2001. *An introduction to igneous and metamorphic petrology*: New York, Prentice Hall, 572 p.