

**RESUMOS DE TESES E DISSERTAÇÕES**  
**ABSTRACTS OF THESES AND DISSERTATIONS**

MODELAGEM DA DEFORMAÇÃO DA CROSTA CONTINENTAL DO NORTE DOS ANDES ATRAVÉS DE INVERSÃO DE DADOS SÍSMICOS E GEODÉSICOS

*Gabriel Enrique Dicelis Salamanca*

DIQUES MESOZOICOS SUBALCALINOS DE BAIXO TITÂNIO DA REGIÃO DOS LAGOS (RJ): GEOQUÍMICA E GEOCRONOLOGIA  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

*Karine Zuccolan Carvas*

CORRENTES INDUZIDAS GEOMAGNETICAMENTE NO BRASIL: MODELAGEM E COMPORTAMENTO GLOBAL

*Patrícia Ferreira de Oliveira Rosa*

MODELAGEM NUMÉRICA DO PADRÃO DE ESFORÇOS NA LITOSFERA E IMPLICAÇÕES NA FORMAÇÃO DO RIFTE CONTINENTAL DO SUDESTE DO BRASIL

*Rafael Monteiro da Silva*

IDENTIFICAÇÃO DE ESTRUTURAS DE SAL A PARTIR DE ANOMALIAS GRAVIMÉTRICAS RESIDUAIS NA BACIA DE SANTOS, SP

*Renata Regina Constantino*

## MODELAGEM DA DEFORMAÇÃO DA CROSTA CONTINENTAL DO NORTE DOS ANDES ATRAVÉS DE INVERSÃO DE DADOS SÍSMICOS E GEODÉSICOS

Gabriel Enrique Dicelis Salamanca

Orientador: Dr. Marcelo Sousa de Assumpção (IAG-USP)

222 p. – Tese (Doutorado) – Defesa 11.11.2016

**RESUMO.** Na costa oeste da América do Sul, ao longo da fossa entre a Colômbia e o Chile, encontra-se a rígida placa de Nazca com a placa sul-americana. A placa de Nazca mergulha sob o continente com movimentos de escorregamento e empurrão pela compressão da crosta superior, esta zona é denominada zona de subducção. Na região sul da placa sul-americana, na altura do Equador, a velocidade horizontal atinge ~60 mm/ano, com incertezas de 1-3 mm/ano nas velocidades horizontais e 3-6 mm/ano nas velocidades verticais. Isto é consistente com um acúmulo de tensão numa falha de subducção, devido ao bloqueio na área de contato das placas durante o período intersísmico e que seria violentamente liberada pela ruptura da falha durante o terremoto. No caso do bloco Norte dos Andes (entre Colômbia e Equador) o regime de esforços compressivo é geralmente bimodal, estes são: 1. Esforço normal à margem, com direção NW-SE produzindo deformação permanente, falhamentos inversos, geração de montanhas e acúmulo de tensão, e 2. Paralelo à margem, com direção ENE-WSW que produz um aparente deslocamento do bloco rígido do Norte dos Andes “escapando” ao nordeste e apresentando falhas laterais dextrais *strike-slip*. No regime de esforços compressivo normal à margem, o acúmulo de tensão é o resultado da convergência das placas da América do Sul, Caribe e Nazca, e a microplaca de Panamá. O falhamento *strike-slip* paralelo à margem está bem documentado ao sudeste do Equador e no Nordeste na Venezuela, mas não é muito claro no segmento de encurtamento de ~100km do Mioceno-Plioceno normal à margem no leste da cordilheira. Este trabalho visa estudar a deformação tectônica relacionada com a geodinâmica regional e a sismicidade do bloco oblíquo do Norte dos Andes. Na primeira etapa do projeto foram calculados vários interferogramas usando imagens de radar de abertura sintética, InSAR, com vários satélites, geometrias orbitais e estratégias de correção de erros, que permitissem determinar a deformação cossísmica de um terremoto. Na segunda etapa foram desenvolvidos vários programas e rotinas para o cálculo e determinação de modelos sintéticos de deslocamento do solo e da linha de visada (LOS) dos diferentes satélites estudados e para as diferentes fases do ciclo dos terremotos (intersísmico, cossísmico, pós-sísmico). Os modelos sintéticos para o problema cossísmico foram usados numa metodologia envolvendo inversão do campo de deslocamento da superfície, que permitissem inferir os parâmetros hipocentrais de um terremoto. Os resultados da modelagem foram validados por meio da comparação com mecanismos focais obtidos usando várias metodologias (como primeiras chegadas das ondas P, inversão de forma de onda) e relocalização de réplicas dos eventos estudados (Quetame, Colômbia 2008 e Pedernales, Equador 2016), mostrando boa concordância. Na terceira e última etapa foram usados dados de GPS para calcular um modelo de deslocamento e velocidades da placa do Norte dos Andes com o intuito de caracterizar as componentes de rotação e deformação.

**ABSTRACT.** On the western coast of South America, along the fault between Colombia and Chile, there is the rigid Nazca plate meeting the South American plate. The Nazca plate is submerged below the continent with sliding movements and compression against the upper crust, this is a subduction zone. In the southern region of the South American plate, at the height of Ecuador, the horizontal velocity reaches ~60 mm/yr, with an uncertainty of  $\pm 1-3$  mm/yr and  $\pm 3-6$  mm/yr in horizontal and vertical velocities. This is consistent with the accumulation of tension in a subduction fault, due to the blockage in the area of contact between the plates during the interseismic period, which would be violently freed by the rupture of the fault during an earthquake. In the case of the northern block of Andes (between Colombia and Ecuador) the regime of forces is compressive and generally bimodal: 1. Normal at the margin, with a NW-SE movement, producing permanent deformation, inverse fault zones, creation of mountains and tension accumulation, and 2. Parallel at the margin, with a ENE-WSW movement that produces an apparent displacement with the rigid northern block of the Andes “escaping” towards the northeast and presenting right lateral strike-slip faults. In the normal compressive regime at the margin, the accumulation of tension is the result of the convergence of the South American, Caribbean and Nazca plates, and the Panama microplate. The parallel strike-slip fault zone at the margin is well documented in southeastern Ecuador and northeastern Venezuela, but was obscured by over 100 km of Miocene-Pliocene margin-normal shortening in the Eastern Cordillera. This work has the objective to study the tectonic deformation related to the regional geodynamic and the seismicity of the oblique block of the northern section of the Andes. In the first stage, the project was calculated with several interferograms using radar images of synthetic aperture, InSAR, with some satellites, orbital geometries and error correction strategies that allowed for the determination of the coseismic deformation of an earthquake in this region. In the second stage there were several programs and routines developed for the calculation and determination of synthetic models of soil displacement in the line of sight (LOS) of different studied satellites and for different phases of the earthquake cycle (interseismic, coseismic, post-seismic). The synthetic models for the coseismic problem were used with a field inversion methodology for the displacement of surfaces obtained with differential InSAR, which made it possible to infer the hypocentral parameters of an earthquake. The results were validated by means of comparison with focal mechanisms obtained utilizing several methodologies (such as first arrivals of P waves and waveform inversion) and relocalization of aftershocks of studied events (Quetame, Colombia 2008 and Pedernales, Ecuador 2016), showing a good agreement. In the third and final stage GPS data were used to calculate a displacement model and velocities for the northern Andes block with the objective of characterizing the rotation and deformation components of the block.

## DIQUES MESOZOICOS SUBCALINOS DE BAIXO TITÂNIO DA REGIÃO DOS LAGOS (RJ): GEOQUÍMICA E GEOCRONOLOGIA $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

**Karine Zuccolan Carvas**

Orientador: Dra. Leila Soares Marques (IAG-USP)  
60 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 14.12.2016

**RESUMO.** Os diques da Região dos Lagos, localizados entre os municípios de Arraial do Cabo, Cabo Frio e Armação dos Búzios (RJ), integram o Enxame de Diques da Serra do Mar (ESM) e apresentam particularidades geoquímicas e geocronológicas que fazem com que seu papel na abertura do Atlântico Sul ainda seja pouco compreendido. Este estudo apresenta os resultados da investigação detalhada sobre a gênese e a idade dessas intrusões, através novas análises de elementos maiores, menores, traços, razões isotópicas (Sr, Nd e Pb) e datações  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . Os diques são quimicamente representados por basaltos toleíticos, andesibasaltos toleíticos e basaltos transicionais, com teores de  $\text{TiO}_2$ , em sua maioria, inferiores a 2% (BTi). Os dados de geoquímica elemental permitem identificar dois grupos, um mais primitivo e empobrecido em elementos incompatíveis (grupo A), e outro mais evoluído e enriquecido nesses elementos (grupo B). Os dados sugerem pouca ou nenhuma influência de contaminação crustal durante a evolução e apontam semelhanças do grupo A com os basaltos BTi (Esmeralda) da Província Magmática do Paraná (PMP). O grupo B, por sua vez, apresenta características distintas dos derrames BTi da PMP. O grupo A possui composições isotópicas pouco radiogênicas em Sr e mais radiogênicas em Pb que o grupo B, assemelhando-se àquelas dos diques Horingbaai da Namíbia. As razões isotópicas de Pb sugerem que os dois grupos foram originados por fontes mantélicas distintas, as quais são também menos radiogênicas que os derrames BTi da PMP. Os dados não se adequam à diferenciação por AFC ou por mistura envolvendo os reservatórios mantélicos clássicos. Este comportamento pode estar relacionado a heterogeneidades do manto litosférico, causadas por longos processos de subducção durante a amalgamação do Gondwana ocidental. As análises  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  mostram que a presença de sericitização e albitização nos plagioclásios pode imprimir as idades desses processos nos espectros. Plagioclásios sericitizados do grupo A forneceram idades de 106-108 Ma, e também um provável evento de albitização em 96 Ma. Tais idades discordam tanto das de plagioclásios frescos (idades máximas de 125-140 Ma), afetados por excesso de Ar em decorrência de inclusões de piroxênio e apatita, como daquelas de 132 Ma obtidas em anfibólio-biotita. Estas últimas devem marcar a intrusão dos diques do grupo A, confirmando sua associação com a PMP. A análise em rocha total de um dique do grupo B apresentou idade máxima de cerca de 108 Ma, sugerindo que a intrusão dos grupos A e B podem não ser contemporâneas. A similaridade entre a idade do grupo B e aquela de soerguimento da costa sudeste sugere que estes diques possam ter sido originados durante esse evento, que também teria causado a alteração (sericitização) dos plagioclásios do grupo A.

**ABSTRACT.** The Região dos Lagos tholeiitic dykes, located in Rio de Janeiro State, encompass the Arraial do Cabo, Cabo Frio and Armação de Búzios towns and integrate the Serra do Mar Dyke Swarm. Their role in the South Atlantic opening processes is still poorly defined because of their peculiar geochemical and geochronological features. In this work, the petrogenesis and the geochronology of these intrusions were investigated in detail based on new data of elemental (major, minor and trace elements) and isotope (Sr, Nd and Pb) geochemistry along with a careful  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating. The dykes are chemically represented by tholeiitic basalts, andesi tholeiitic basalts and transitional basalts, usually presenting  $\text{TiO}_2$  contents lower than 2% (LTi). The elemental geochemistry allows the recognition of two magmatic groups; one of them is more primitive and depleted in incompatible elements (group A), whereas the other one is more evolved and enriched in these elements (group B). The data also indicate that crustal assimilation, if existed, had a small role in the magmatic evolution of both groups, and point out similarities between group A and the LTi flows (Esmeralda) from the Paraná Magmatic Province (PMP). Group B, in turn, displays geochemical features very different from those of the LTi basalts from PMP. The Sr isotope compositions of group A are less radiogenic than those of the B one, but the opposite occurs with Pb, which makes the first group similar to the Horingbaai dykes from Namibia. The Pb isotope ratios indicate that A and B were originated from distinct mantle sources, which also differ from those related to PMP LTi flows. The isotope data are not compatible with assimilation-fractional crystallization processes or simple mixtures involving the classic mantle reservoirs. This behavior suggests origin in heterogeneous lithospheric subcontinental mantle, probably affected by long subduction periods during Western Gondwana amalgamation. The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronological data point out that the presence of plagioclase sericitization and albitization in their rims may imprint the age of these events in the age spectra. Sericitized plagioclase grains of group A displayed ages of 106-108 Ma, while the albitized fractions provided ages of 96 Ma. Such results disagree with both the fresh plagioclase grains (maximum ages of 125-140 Ma), very affected by excess Ar due to pyroxene and apatite inclusions, and the 132 Ma age of the amphibole-biotite aliquots. This last result very probably corresponds to the dyke emplacement event, confirming the genetic relationship between group A and the PMP. Whole rock dating in a sericite-free group B dyke provided maximum age of 108 Ma, which would imply that A and B groups are not coeval. The similarity between the last age and the uplifting event of Southwestern Brazilian coast suggests that the dykes of group B could have been generated during such process, which also altered (sericitized) the plagioclases of the group A dykes.

## **CORRENTES INDUZIDAS GEOMAGNETICAMENTE NO BRASIL: MODELAGEM E COMPORTAMENTO GLOBAL**

**Patrícia Ferreira de Oliveira Rosa**

Orientador: Dr. Andrés Reinaldo Rodriguez Papa (ON)  
79 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 23.12.2016

**RESUMO.** Atualmente existe uma forte tendência ao uso de sistemas computadorizados na solução dos problemas de medição e controle aplicado na pesquisa e no ensino de Ciências em geral e, em particular, de Física e Geofísica. Por outro lado, a instrumentação científica continua sendo cara e de difícil manutenção. Por esta razão, sistemas versáteis de simulação são muito bem recebidos pela comunidade científica e acadêmica, seja para fins puramente didáticos, seja para fins de pesquisa científica ou desenvolvimento instrumental. O objetivo deste presente trabalho é a construção de uma plataforma, via *software*, para diversas configurações de magnetômetros fluxgate. A finalidade principal é compor um aplicativo para laboratório no qual sejam desenvolvidos e construídos magnetômetros fluxgate abertos, permitindo uma avaliação prévia desses instrumentos, sendo a interface com o usuário extremamente versátil. A topologia denominada detecção síncrona por segundo harmônico, utilizada por F. Primdahl foi adotada como primeira topologia de simulação na plataforma LabVIEW (acrônimo para Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench). Como entrada de sinal foi utilizada um sinal sintético do sensor. Um resultado importante deste trabalho poderá ser a aplicação futura de um sinal de entrada com um núcleo sensor real e efetivo para fins de avaliação, análise e desempenho comparativo entre diversas topologias.

**ABSTRACT.** Currently there is a strong tendency towards the use of computer systems in the solution of problems of measurement and control applied in the research and teaching of Sciences in general, and in particular of Physics and Geophysics. On the other hand, scientific instrumentation remains expensive and difficult to maintain. For this reason, versatile systems of simulation are well received by the scientific and academic community, either for purely didactic purposes, or for the purposes of scientific research or instrumental development. The objective of the present work is the construction of a platform, via software, for several fluxgate magnetometer configurations. The main purpose is to compose a laboratory application in which open fluxgate magnetometers are developed and built, allowing a prior evaluation of these instruments, the user interface being extremely versatile. The topology called synchronous detection per second harmonic used by F. Primdahl was adopted as the first simulation topology in the LabVIEW platform (acronym for Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench). As a signal input, a synthetic sensor signal was used. An important result of this work may be the future application of an input signal with a real and effective sensor core for evaluation, analysis and comparative performance among several topologies.

## MODELAGEM NUMÉRICA DO PADRÃO DE ESFORÇOS NA LITOSFERA E IMPLICAÇÕES NA FORMAÇÃO DO RIFTE CONTINENTAL DO SUDESTE DO BRASIL

**Rafael Monteiro da Silva**

Orientador: Dr. Victor Sacek (IAG-USP)

108 p. – Dissertação (Mestrado) – Defesa 10.11.2016

**RESUMO.** O Rifte Continental do Sudeste do Brasil é uma das feições geotectônicas mais expressivas da margem continental brasileira e sua formação influenciou significativamente o padrão de transporte de sedimentos para as bacias marginais de Santos e Campos. Diferentes modelos foram propostos para a origem deste rifte e envolvem a reativação, como falhas normais, de zonas de cisalhamento Pré-Cambrianas. Não obstante, esses modelos são qualitativos e não existem experimentos numéricos que avaliaram a viabilidade dos mecanismos propostos para a origem do rifte. O presente trabalho teve como objetivo estudar a gênese deste rifte e analisar quantitativamente como diferentes fatores geológicos podem ter influenciado sua formação. Essa análise foi realizada numericamente a partir da simulação da evolução de uma margem divergente representativa do sudeste do Brasil. Foi utilizado um modelo numérico bidimensional que descreve a reologia da litosfera como um material viscoelástico de Maxwell na condição de deformação plana, permitindo analisar o estado de esforços na litosfera ao longo do tempo. Os fatores geológicos considerados nos testes numéricos incluíram erosão do continente, sedimentação ao longo da margem estirada, soerguimento regional induzido por uma anomalia térmica mantélica e esforço tectônico intraplaca relacionado ao empurrão pela expansão da cadeia meso-ocêânica e orogenia andina. Esses fatores foram considerados separadamente e conjuntamente nos testes. Para avaliar o limite de ruptura das rochas foi considerado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb para diferentes valores de coesão interna da rocha. Foi observado que, quando considerados separadamente, tanto a erosão como a sedimentação produziram um estado de esforços compatível com falhamento normal na região continental próxima à margem estirada. No entanto, o soerguimento regional induzido pela passagem de uma anomalia térmica na base da litosfera produz inexpressiva mudança da tensão deviatória na crosta superior. O efeito sobreposto da erosão e da sedimentação no balanço de cargas sobre a litosfera produziu uma maior magnitude dos esforços resultando em uma condição suscetível à formação de falhas normais profundas, até o limite da crosta superior, na margem emersa. De modo semelhante, a sobreposição de uma compressão regional resultou em uma ligeira diminuição da profundidade do limite de ruptura para as rochas da crosta superior. Os resultados deste trabalho mostraram que o balanço de cargas devido à erosão da porção emersa do sudeste do Brasil e à sedimentação nas bacias marginais juntamente com baixos valores de coesão interna das rochas durante a evolução da margem divergente foram responsáveis por produzirem um estado de esforços na litosfera compatível com falhas normais profundas, e o efeito de um soerguimento regional causado por uma anomalia térmica assim como o efeito de uma compressão horizontal regional, não afetaram significativamente o estado de esforços de modo a alterar expressivamente a condição de ruptura das rochas ao longo da margem continental.

**ABSTRACT.** The Continental Rift of Southeastern Brazil is a remarkable feature at the Brazilian continental margin and its formation significantly influenced the sediment transport pattern to the Santos and Campos marginal basins. Several models were proposed to explain the genesis of the rift and involve the reactivation of Precambrian shear zones as normal faults. However, these models are qualitative and there is a lack of numerical experiments regarding the validity of the proposed mechanisms for the rift genesis. The aim of this work is to study the genesis of the rift and analyze quantitatively how different geological factors can affect its formation. The analysis were conducted through numerical simulations of the evolution of a divergent margin which represents the southeastern Brazil. The two-dimensional numerical model used to represent the lithospheric rheology by a Maxwell viscoelastic material in a state of plane strain and permits the analysis of the lithospheric state of stress throughout time. The geological factors considered in the numerical tests included the continental erosion, sedimentation, regional uplift induced by thermal mantle anomaly and the wide-plate tectonic stress due the ridge-push. These factors were considered separately and superimposed in the numerical tests. The Mohr-Coulomb criterion was adopted to calculate the failure condition, taking into account different values for the cohesion factor. Both erosion and sedimentation, when considered separately, produced a tectonic setting compatible with normal faulting near the stretched continental margin. However, the regional uplift due to the passage of a thermal anomaly on the base of the lithosphere didn't expressively affected the change of deviatoric stresses in the upper crust. The superimposed effect of erosion and sedimentation in the load balance on the lithosphere produced greater stresses magnitudes resulting in a favorable condition for the formation of deep normal faulting, up to the base of upper crust, under the onshore margin area. Similarly, the superimposed effect of compressive stresses resulted in the shallowing of the rupture limit of the upper crust. The results of this work showed that the load on the lithosphere due to erosion of the onshore continental area in the southeastern Brazil and the sedimentation on the marginal basins during the evolution of the margin were responsible to produce a state of stress in the lithosphere favorable to the formation of deep normal faulting and either the effect of regional uplift caused by a thermal anomaly or the compressive horizontal stresses didn't significantly influenced the state of stress to change the rupture condition of rocks along the continental margin.

## IDENTIFICAÇÃO DE ESTRUTURAS DE SAL A PARTIR DE ANOMALIAS GRAVIMÉTRICAS RESIDUAIS NA BACIA DE SANTOS, SP

**Renata Regina Constantino**

Orientador: Dr. Eder Cassola Molina (IAG-USP)  
121 p. – Tese (Doutorado) – Defesa 02.05.2016

**RESUMO.** Localizada na margem continental brasileira, a Bacia de Santos é a maior bacia de sal do Atlântico Sul, e, devido ao seu alto potencial econômico, é tema recorrente em estudos científicos. As estruturas de sal presentes na região são importantes para o acúmulo de hidrocarbonetos, e são comumente estudadas a partir de dados de sísmica de reflexão, que apresentam alto custo de aquisição e processamento. Este trabalho visa identificar tais estruturas a partir do estudo de anomalias gravimétricas residuais, que são de mais fácil obtenção e menos dispendiosas. Na primeira etapa do trabalho foi determinada a profundidade da descontinuidade de Mohorovicic (Moho) e a profundidade do embasamento a partir de uma metodologia envolvendo a inversão do campo gravimétrico. Na segunda etapa, as interfaces Moho e embasamento foram utilizadas para a modelagem gravimétrica direta, e um modelo geológico de três camadas foi criado com os seguintes pacotes: sedimentos presentes acima do embasamento, crosta e manto. A anomalia gravimétrica referente a este modelo foi calculada e subtraída da anomalia total observada, resultando na anomalia residual, admitida como representativa das estruturas de sal na região, que foi invertida na última etapa do trabalho. Os resultados do modelo inverso obtido foram validados por meio de sua comparação com a camada de sal obtida pela interpretação de seções de sísmica de reflexão 2D, mostrando boa concordância. A partir desta metodologia e dos parâmetros calculados, foi estabelecido um procedimento padrão para a determinação de estruturas de sal na Bacia de Santos (incluindo pacotes de sal estratificado), que não necessita de informações sísmicas, e que poderá ser adotado para estudos futuros. Trata-se de um método rápido e de custo reduzido, que pode fornecer valiosas informações para o planejamento de aquisição sísmica e para a interpretação de dados geofísicos em regiões *offshore* onde existam estruturas propícias ao acúmulo de hidrocarbonetos.

**ABSTRACT.** Located in the Brazilian continental margin, the Santos Basin is the largest salt basin of the South Atlantic, and due to its high economic potential, it is a recurrent theme in scientific studies. The salt structures present in the region are of great importance for hydrocarbon accumulation, and they are commonly studied from seismic reflection data, which present a high acquisition and processing cost. This work aims to identify these structures from the study of residual gravity anomalies, which are less expensive and easier to obtain. In the first step, the Mohorovicic discontinuity depth (Moho) and the basement depth were obtained from a method involving the inversion of the gravity field. In the second step, the Moho and the basement interfaces were used for forward gravimetric modeling, and a geological model of three layers was created with the following packages: sediments above the basement, crust and mantle. The gravity anomaly related to this model was calculated and subtracted from the observed anomaly, resulting in the residual anomaly, admitted as representative of the salt structures effect in the region, which was inverted in the last step. The results obtained from the inverse model were validated by comparison with the salt layer obtained by interpretation of 2D reflection seismic lines, showing a good agreement. From this methodology and from the calculated parameters, a standard procedure was established for the determination of the salt structures in the Santos Basin (including stratified packets of salt), which does not require seismic information and may be adopted for future studies. This is an efficient method with low cost, that provide valuable information for seismic acquisition planning and interpretation of geophysical data in offshore regions with structures favourable to gas and hydrocarbon accumulation.