

JOÃO PEDRO MARTINS TEIXEIRA D'ARAÚJO

**CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTABELECIMENTO DE UMA
REDE PERMANENTE GNSS PARA MONITORIZAÇÃO DOS
SISTEMAS VULCÂNICOS ATIVOS DO ARQUIPÉLAGO DOS
AÇORES**



DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

UNIVERSIDADE DOS AÇORES

2014

JOÃO PEDRO MARTINS TEIXEIRA D'ARAÚJO

**CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTABELECIMENTO DE UMA
REDE PERMANENTE GNSS PARA MONITORIZAÇÃO DOS
SISTEMAS VULCÂNICOS ATIVOS DO ARQUIPÉLAGO DOS
AÇORES**

TESE REALIZADA NO ÂMBITO DO MESTRADO EM VULCANOLOGIA E RISCOS GEOLÓGICOS,
DE ACORDO COM O DISPOSTO DO ARTº 14º DO REGULAMENTO DO MESTRADO EM
VULCANOLOGIA E RISCOS GEOLÓGICOS, PUBLICADO EM DIÁRIO DA REPÚBLICA, II SÉRIE,
N.º 189, DE 17 DE AGOSTO DE 2000.

ORIENTADOR:

PROFESSORA DOUTORA TERESA DE JESUS LOPES FERREIRA

CO-ORIENTADOR:

DOUTOR JUN OKADA

CO-ORIENTADOR:

DOUTOR FREYSTEINN SIGMUNDSSON



DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

UNIVERSIDADE DOS AÇORES

2014

À minha família e amigos.

«Se a montanha não vai a Maomé, vai Maomé à montanha.»

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VI
AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
PREÂMBULO	X
1 - Introdução	14
1.1 - O Interior da Terra	14
1.2 - Tectónica e Vulcanismo.....	17
1.3 - Deformação Vulcânica.....	19
1.4 - Monitorização Vulcânica.....	21
1.4.1 - Monitorização Geodésica	21
1.4.2 - Técnicas de Monitorização Geodésica Clássicas.....	23
1.4.3 - Técnicas de Monitorização Geodésica Espaciais.....	23
1.4.3.1 - Técnica InSAR	23
1.4.3.2 - Técnica GNSS	24
1.4.3.2.1 - Segmentos do Sistema GNSS	25
1.4.3.2.2 - Atributos e Requisitos da Técnica GNSS.....	26
1.4.3.2.3 - Vantagens e Desvantagens da Técnica GNSS.....	27
1.4.3.2.4 - Modos de Utilização da Técnica GNSS.....	27
1.4.3.2.5 - Potencial Futuro da Técnica GNSS.....	28
1.4.3.2.6 - Definição do Posicionamento GNSS.....	31

1.4.3.2.7 - Transformação de Coordenadas	36
1.4.4 - Outras Técnicas de Monitorização	38
2 - CASOS DE ESTUDO DE DEFORMAÇÃO VULCÂNICA	41
2.1 - Metodologia	42
2.2 - Caracterização da região dos Açores	46
2.2.1 - Geografia	46
2.2.2 - Enquadramento Geoestrutural	46
2.2.3 - Vulcanismo e Sismicidade	48
2.3 - Fogo - Açores	51
2.4 - Campos Flegreanos - Itália	55
2.5 - El Hierro - Canárias	58
2.6 - Eyjafjallajökull - Islândia	60
2.7 - Yellowstone – Estados Unidos	64
3 - REDE GNSS PERMANENTE DOS AÇORES	66
3.1 - Metodologia	66
3.1.1 - Pré-Processamento	68
3.1.2 - Processamento - <i>Software</i> Bernese	70
3.1.3 - Pós-Processamento - <i>Software</i> Matlab	71
3.1.4 - Dificuldades	74
3.2 - Sistema de Processamento Automático	75
3.2.1 - Esquema das etapas do processamento automático	77
3.2.2 - Resultados	78
3.3 - Estudos Geodésicos Realizados nos Açores	80
3.4 - Redes GNSS	82

3.4.1 - Recetor e Antena.....	84
3.4.2 - Monumento Geodésico	84
3.4.3 - Instalação	85
3.4.4 - Energia	86
3.4.5 - Transmissão de dados	87
3.4.6 - Rede permanente do CIVISA.....	88
4 - DISCUSSÃO	90
CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
BIBLIOGRAFIA.....	100
ANEXO I	A1
ANEXO II	A3
ANEXO III	A4
ANEXO IV.....	A5
ANEXO V	A6
ANEXO VI.....	A7
ANEXO VII.....	A8

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - As quatro etapas de formação de um sistema vulcânico (adaptado de Parfitt e Wilson, 2008). Etapa 1 - Formação de magma por fusão parcial da rocha. Etapa 2 - Movimento de magma a afastar-se da zona de formação. Etapa 3 - Armazenamento de magma. Etapa 4 - Transporte de magma e erupção.

Figura 1.2 - Esquema conceptual das interações magmáticas e hidrotermais, e deformação crustal resultante (adaptado de Fournier *et al.*, 2012).

Figura 1.3 - Segmentos do GNSS (adaptado de El-Rabbany, 2012).

Figura 1.4 – Espectro de duração dos períodos de amostragem utilizados por diferentes tipos de estudo, reologia e processos geológicos abrangidos (Pollard *et al.*, 2003).

Figura 1.5 - Princípio básico do posicionamento por satélite (adaptado de Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Figura 1.6 - Representação 2D das pseudodistâncias entre um recetor *A* e os satélites *i*, *j* e *k* (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Figura 1.7 – Sistema de referência global de coordenadas cartesianas (*X,Y,Z*) e elipsoidais (λ, φ), e sistema local de coordenadas geográficas (*n, e, u*) (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Figura 1.8 – Projecção das coordenadas geográficas (*n, e, u*) (Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008).

Figura 2.1 - Localização geográfica do arquipélago dos Açores.

Figura 2.2 - Principais estruturas tectónicas dos Açores (adaptado de Ferreira, 2000).

Figura 2.3 – Localização das erupções históricas dos Açores (CVARG 2014b).

Figura 2.4 – Atividade sísmica entre 1980 e 2010, nos Açores (CIVISA).

Figura 2.5 – Mapa do vulcão do Fogo com a localização das estações geodésicas FOG3 no bordo da caldeira e ARE1 no flanco leste, representadas pelas bandeiras verdes (Trota, 2008). De acordo com o autor, na primeira fase o centro de deformação modelado, representado pela estrela amarela, localizava-se numa zona próxima das Lombadas, enquanto na segunda e na terceira fase de deformação localizava-se mais para leste numa zona próxima da estação ARE1 (estrela cor-de-laranja).

Figura 2.6 - Séries temporais da altura relativa das estações GNSS de campanha FOG3 (azul) e ARE1 (vermelho) (adaptado de Trota, 2008) e número de sismos, por mês, representado pelas barras cinzentas ($M_d \geq 1.5$) entre 1999 e 2008 (adaptado de Silva *et al.*, 2012), no vulcão do Fogo.

Figura 2.7 - Mapa dos Campos Flegreanos com a localização da estação geodésica 25A, representada pela bandeira verde (Gaudio *et al.*, 2010) e do centro de deformação modelado para o episódio de 1982-1984 (Trassati *et al.*, 2011), representado pela estrela amarela.

Figura 2.8 - Série temporal da altura relativa da estação de nivelamento 25A representada a azul (adaptado de D'Auria *et al.*, 2011) e número de sismos, por mês, representado nas barras cinzentas ($0,1 \leq M_L \leq 4,2$) (adaptado de Berrino e Yokoyama, 2011 e D'Auria *et al.*, 2011), entre 1980 e 2000, nos Campos Flegreanos.

Figura 2.9 - Mapa de El Hierro com a localização da estação geodésica FRON, representada pela bandeira verde e dos centros de deformação modelados, referentes aos dias 22 de Agosto (estrela amarela) e 10 de Outubro (estrela cor-de-laranja) (García

CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTABELECIMENTO DE UMA REDE PERMANENTE GNSS PARA MONITORIZAÇÃO DOS SISTEMAS VULCÂNICOS ATIVOS DO ARQUIPÉLAGO DOS AÇORES

et al., 2013). O local onde a erupção submarina ocorreu, no dia 10 de outubro, está representada pelo triângulo vermelho (García *et al.*, 2014).

Figura 2.10 – Série temporal da altura relativa da estação GNSS permanente FRON (Martí *et al.*, 2013) e número de sismos a cinzento, por dia, entre julho e novembro de 2011 (Gonzalez *et al.*, 2013), no vulcão de El Hierro.

Figura 2.11 - Mapa de Eyjafjallajökull com a localização da estação geodésica SELJ, representada pela bandeira verde e dos centros de deformação modelados, referentes às intrusões de 1994 (estrela amarela) e de 1999-2000 (estrela cor-de-laranja) (Sturkell e Sigmundsson, 2003; Pedersen e Sigmundsson, 2006). A erupção de março de 2010 no flanco do vulcão é representada pelo triângulo vermelho situado mais para leste, enquanto a erupção de abril no topo do vulcão é representada pelo triângulo vermelho situado mais para oeste (Sigmundsson *et al.*, 2010).

Figura 2.12 – Série temporal da altura relativa da estação GNSS de campanha SELJ (adaptado de Sturkell e Sigmundsson 2003) e número de sismos, por mês, representado pelas barras cinzentas, entre 1994 e 2000 (adaptado de Thorkelsson *et al.*, 2012), no vulcão Eyjafjallajökull.

Figura 2.13 - Mapa de Yellowstone com a localização das estações geodésicas NRWY e LKWY, representadas pelas bandeiras verdes, e dos centros de deformação modelados, referentes à deformação ocorrida em Norris (estrela amarela) e em Sour Creek (estrela cor-de-laranja) entre 2004 e 2005 (Aly e Cochran, 2011).

Figura 2.14 - Séries temporais da altura relativa da estação GNSS permanente LKWY (vermelho) e NRWY (azul) e número de sismos (cinzento), por mês, entre 2004 e 2011 (adaptado de Chang *et al.*, 2010), em Yellowstone.

Figura 3.1 – Esquema exemplificativo da disponibilidade dos produtos para o processamento rápido e final. Supondo que o dia atual é o dia 15, a partir das 16 horas UTC deste dia é feito o processamento rápido dos dados do dia 14 e o processamento final dos dados do dia 1.

Figura 3.2 – Sequência diária das etapas do processamento GNSS automático. A descrição de cada etapa encontra-se no Anexo I.

Figura 3.3 - Série temporal da posição da componente norte da estação SRPC entre julho de 2013 e julho de 2014.

Figura 3.4 - Regressão linear (linha verde) da série temporal dos resultados finais da componente norte da estação SRPC.

Figura 3.5 - Série temporal da posição da componente norte da estação SRPC sem tendência tectónica.

Figura 3.6 - Etapas do sistema de processamento GNSS automático: aquisição dos dados, preparação dos dados, processamento dos dados e visualização e análise dos resultados.

Figura 3.7 - Séries temporais destendenciadas da estação SRPC, nas três componentes espaciais geográficas.

Figura 3.8 – Equipamento usado numa estação GNSS (adaptado de UNAVCO, 2014b).

Figura 3.9 – (esquerda) Monumento geodésico em inox do tipo *shallow non-drilled braced* (UNAVCO, 2014d) e (direita) monumento geodésico em inox utilizado pelo IMO, na Islândia (2014).

Figura 3.10 – (esquerda) Estrutura metálica para abrigar o equipamento GNSS permanente (UNAVCO, 2010c) e (direita) equivalente, em betão, usada pelo CIVISA (estação da Ribeira Chã, São Miguel).

Figura 3.11 - Mapa preliminar com exemplo da localização das estações GNSS já instaladas e a instalar, no futuro, no Grupo Central do Arquipélago dos Açores.

Figura 3.12 - (esquerda) Mapa preliminar com exemplo da localização das estações GNSS já instaladas e a instalar, no futuro, no Grupo Ocidental do Arquipélago dos Açores e (direita) no Grupo Oriental.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Erros associados às observações GNSS.

Tabela 2.1 – Parâmetros de atividade sismovulcânica dos casos de estudo: nome do vulcão, período de crise em análise, atividade eruptiva, duração da deformação, magnitude da deformação, subsidência pós-soerguimento, profundidade do (s) corpo (s) de deformação modelado (s), localização da sismicidade (localizada numa única zona, com alternância entre enxames mas sem migração ou enxames com migração evidente), número máximo de sismos por mês, magnitude máxima dos sismos, profundidade da maioria dos sismos e referências utilizadas.

Tabela 3.1 – RMS dos resíduos do processamento final e rápido da estação SRPC, nas três componentes espaciais geográficas.

Tabela 3.2 - Valores médios dos erros formais e dos erros realísticos obtidos para a estação SRPC.

Tabela 3.3 – Velocidade da estação SRPC entre 2013 e 2014 e velocidade da estação TERC entre 1993 e 2001 (Fernandes *et al.*, 2006).

AGRADECIMENTOS

Quero fazer um agradecimento especial aos meus professores Doutor João Luís Roque Baptista Gaspar e Doutora Teresa de Jesus Lopes Ferreira, por me terem convidado a ingressar no grupo de geodesia do CIVISA. Agradeço a ambos a oportunidade que me concederam e a confiança que depositaram em mim. Além disso, agradeço à minha supervisora – Doutora Teresa Ferreira – a definição das metas e das diretrizes, e o importante apoio prestado que contribuiu para enriquecer este documento.

Gostaria, também, de agradecer ao Doutor Jun Okada o seu contributo fundamental, visível quer na definição das metas e das diretrizes, e na informação concedida, quer na sua total disponibilidade, na discussão de ideias e no esclarecimento de dúvidas, durante a elaboração do trabalho; deixo aqui, ainda, uma palavra de gratidão ao Doutor Freysteinn Sigmundsson, pela sua ajuda importante, manifesta no intercâmbio e debate de ideias, a qual permitiu redefinir algumas estratégias iniciais.

Aos meus pais, pela educação e por todas as oportunidades de formação que me proporcionaram ao longo da vida. Pela paciência e pela compreensão que, muitas vezes, tiveram comigo. À minha namorada Sónia, que todos os dias me dá força, motivação e tranquilidade para trabalhar e estudar; à minha irmã, por ser um modelo de empenho e de competência e por me ter incentivado sempre a continuar os meus estudos.

Quero, ainda, agradecer à minha colega Maria Lorenzo, por tornar os meus dias de trabalho menos solitários, pela sua boa disposição e pelo seu companheirismo; aos membros do grupo de comunicações, informática e eletrónica, pelo intercâmbio de ideias e esclarecimentos, nomeadamente ao Eng^o. Carlos Primo.

Gostaria, também, de deixar o meu reconhecimento aos elementos de apoio do Instituto de Astronomia da Universidade de Berna, no esclarecimento de dúvidas sobre o funcionamento do *software* de processamento Bernese.

Finalmente, quero manifestar o meu apreço ao Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos dos Açores e ao Centro de Informação e Vigilância Sismovulcânica dos Açores, pelo arranque deste projeto no qual estou inserido, na minha área de estudos, prestando, assim, um contributo que almejo de significativo para os Açores.

Este trabalho teve o apoio do projeto MED-SUV – Mediterranean Supersite Volcanoes, financiado através do contrato nº 308665 da União Europeia, do 7º Programa Quadro.

RESUMO

O trabalho apresentado no âmbito desta tese foca-se no estudo da deformação crustal em sistemas vulcânicos ativos, através da aplicação da técnica de geodesia espacial GNSS (*Global Navigation Satellite System*). A deformação crustal é reconhecida como um importante sinal precursor da atividade sismovulcânica e o GNSS é, atualmente, a técnica mais usada no seu estudo. Nas últimas duas décadas, os avanços das técnicas de geodesia espacial aplicadas à monitorização sismovulcânica têm permitido a deteção de períodos de reativação de sistemas vulcânicos, antecipado-se, até, a ocorrência de erupções.

O peculiar enquadramento geodinâmico da Junção Tripla dos Açores, aliado às especificidades geológicas determinadas pelas suas características vulcânicas, faz destas ilhas um excelente laboratório natural para o desenvolvimento de estudos de deformação crustal. Desde o seu povoamento até à atualidade, registaram-se várias erupções históricas nos Açores, sendo a erupção dos Capelinhos, na ilha do Faial, o exemplo marcante mais recente. Houve, também, episódios mais recentes de agitação no vulcão do Fogo, em São Miguel, culminando em 2005 e em 2012. Nestes episódios observou-se elevada deformação crustal, para além de atividade sísmica.

A deformação vulcânica pode ser melhor compreendida através da pesquisa sobre a deformação crustal observada em vários vulcões do mundo. Deste modo, realizou-se um estudo comparativo dos padrões espaciais e temporais de deformação observados em vários vulcões, tendo, também, em consideração a atividade sísmica. Pretendeu-se, assim, expor o modo como as crises sismovulcânicas se expressam em diferentes ambientes geodinâmicos e geológicos, com o objetivo de se encontrar semelhanças nos processos de origem.

Da análise aos episódios de intrusão pesquisados, em que não houve erupção, verifica-se que: nos Campos Flegreanos (1982-1984, 2000-2001 e 2005-2007), no Fogo (2003-2006 e 2011-2012) e em Yellowstone (2004-2008), houve soerguimento (elevação) do terreno, seguida de subsidência, e intensa micro-sismicidade superficial, enquanto nos episódios de 1994 e 1999-2000, em Eyjafjallajökull, não houve subsidência do terreno e a micro-sismicidade foi reduzida e raramente superficial.

Desenvolveu-se um sistema integrado de processamento GNSS automático e de visualização dos resultados. O sistema possibilita a monitorização, em tempo quase-real, das estações GNSS locais, nomeadamente das redes do CIVISA (Centro de Vulcanologia e

Avaliação de Riscos Geológicos) e da REPRAA (Rede de Estações Permanentes da Região Autónoma dos Açores) e permite a deteção rápida da deformação vulcânica nos Açores.

ABSTRACT

The work presented in this thesis is focused on the study of ground deformation in volcanic systems, by applying the GNSS (Global Navigation Satellite System) space geodetic technique. Ground deformation is known to be an important precursory signal of seismo-volcanic activities and GNSS is the most used technique for studying it nowadays. In the last two decades the advances in space geodesy techniques applied to volcano monitoring allowed the detection of unrests and the anticipation of eruptions.

The peculiar geodynamic framework of the Azores Triple Junction, combined with the geological specificities determined by its volcanic features, makes Azores an excellent natural laboratory for ground deformation studies. Since its settlement, there were several historical eruptions in the Azores, with the 1957 eruption of Capelinhos, Faial Island, as the latest striking example. Recent volcanic unrest episodes without an eruption were also evident in Fogo volcano, S. Miguel Island, culminating in 2005 and in 2012. In these episodes both ground deformation and seismic activity were measured.

Understanding of volcanic deformation can be gained by exploring ground deformation activities at various volcanoes around the world. Thus, a comparative study of temporal and spatial deformation patterns was made with several volcanoes taking also into consideration the seismic activity, by examining the available literatures and published data sets. This was intended to expose how the volcanic crisis are expressed in different geodynamic and geological environments, and to find similarities in the source processes.

From the analysis of the unrest episodes with no occurring eruption that were researched it was concluded that: in Campi Flegrei (1982-1984, 2000-2001 and 2005-2007), in Fogo (2003-2006 and 2011-2012) and in Yellowstone (2004-2008) there was inflation followed by deflation, accompanied by intense micro-seismicity at shallow depths but in the episodes of 1994 and 1999-2000 in Eyjafjallajökull there was no deflation and the seismic events were much less frequent and rarely occurred at shallow levels.

To meet the regional requirements of establishing early warning systems in the Azores, an integrated automatic system for GNSS data processing and visualization of time-series was newly developed. The system enables near real-time monitoring of the local GNSS stations, such as CIVISA (Centro de Vulcanologia e Avaliação de Riscos Geológicos) and REPRAA

(Rede de Estações Permanentes da Região Autónoma dos Açores) networks, and the quick detection of volcano deformation in Azores.

PREÂMBULO

Desde sempre, os vulcões abriram as portas à imaginação das pessoas, devido às suas estruturas impressionantes e aos efeitos devastadores que, por vezes, provocam. O conhecimento sobre estas magníficas e perigosas estruturas geológicas evoluiu muito, desde a associação a fenómenos sobrenaturais, no passado, até à análise e interpretação de dados científicos, na actualidade. Hoje, sabe-se que os vulcões e as erupções são o resultado de processos geológicos dinâmicos e complexos que ocorrem no interior da Terra.

Sabe-se, atualmente, que os vulcões se deformam antes, durante e depois das erupções. A experiência da monitorização sismovulcânica mostra que, virtualmente, quase todas as erupções vulcânicas são acompanhadas por mudanças físicas e/ou químicas observáveis à superfície terrestre, facto evidenciado por inúmeros estudos de diversos ramos científicos.

Neste contexto, a geodesia é um dos ramos científicos que tem prestado um contributo fundamental para a compreensão dos fenómenos físicos que ocorrem na superfície da Terra, tendo sofrido uma evolução significativa nos últimos anos ao nível de equipamentos e técnicas utilizadas, permitindo aos cientistas compreender os padrões de deformação dos vulcões. Se no início da monitorização geodésica, apenas se utilizavam instrumentos no terreno, hoje recorre-se, também, a satélites localizados a milhares de quilómetros dos locais de observação. A geodesia, e em particular a técnica GNSS (*Global Navigation Satellite System*), permite medir a posição de pontos da superfície da Terra com grande precisão. Sendo multidisciplinar, é, ao mesmo tempo, um ramo da matemática aplicada e um ramo das ciências da Terra, apresentando, ainda, uma grande componente de computação.

Geralmente, os vulcões deformam-se muito pouco, entre alguns milímetros a centímetros. Para medir tais deformações é necessário o uso de equipamentos com precisão muito superior aos de navegação por satélite comerciais. Por essa razão, usam-se recetores e antenas GNSS, especialmente desenvolvidos para o efeito, e realiza-se o processamento dos dados adquiridos pelos equipamentos.

O arquipélago dos Açores representa uma região vulcânica ativa. Vários foram os estudos feitos ao nível da história eruptiva dos seus sistemas vulcânicos. As erupções mais recentes foram a dos Capelinhos em 1957-1958 (Machado *et al.*, 1962) e a da Serreta em 1998-2001

(Gaspar *et al.*, 2003). Através de diversas técnicas de monitorização vulcânica tem sido possível conhecer melhor os sistemas vulcânicos das várias ilhas e, em particular, o seu nível de atividade e o risco associado, como é o caso do vulcão do Fogo, na ilha de São Miguel, cuja atividade culminou em 2005 (Silva *et al.*, 2012) e em 2011-2012 (Okada *et al.*, 2015 - publicação aceite).

As técnicas geodésicas, e em especial a técnica GNSS, permitem responder a questões essenciais, a saber: quando e de que forma a deformação vulcânica começa, qual a sua magnitude e origem e como evolui ao longo do tempo. Desta forma, assume-se como uma técnica muito importante na monitorização sismovulcânica, sendo possível inferir quais serão as etapas seguintes da atividade vulcânica, nomeadamente em relação ao perigo de erupção, e os locais mais suscetíveis de serem afetados.

Vive-se, hoje, uma época aliciante, pois passou a ser possível detetar modificações dos sistemas vulcânicos e, deste modo, distinguir e compreender alguns mecanismos que acontecem antes, durante e depois das erupções. Face ao risco vulcânico existente nos Açores devem ser tomadas medidas para a sua mitigação, podendo-se, assim, reduzir as suas consequências. É uma experiência única poder analisar e estudar, em primeira mão, os fenómenos geofísicos que ocorrem nos vulcões dos Açores. Ademais, é um privilégio poder contribuir para a melhoria do conhecimento dos fenómenos que ocorrem nestas estruturas, ajudando na identificação e alerta da atividade sismovulcânica na Região.

Existem alguns vulcões que são monitorizados com redes geodésicas muito avançadas, em países como os Estados Unidos, o Japão e a Islândia, que já têm uma longa e vasta experiência no acompanhamento de erupções vulcânicas. As técnicas geodésicas têm contribuído, em alguns casos, para a emissão de alertas que permitiram a evacuação precoce das populações, aumentando de forma efetiva a sua segurança e contribuindo para aumentar a confiança das pessoas nos centros de monitorização (e.g. Jousset *et al.*, 2003; Thorkelsson *et al.*, 2012). No caso dos Açores, tem havido um progresso gradual na monitorização geodésica dos vários sistemas vulcânicos ativos.

No âmbito deste trabalho, recorreu-se, essencialmente, ao conhecimento acerca da monitorização vulcânica, nomeadamente na aplicação da técnica GNSS, com o objetivo de se otimizar a sua aplicação na monitorização dos sistemas vulcânicos ativos dos Açores.

Neste contexto, procedeu-se à seleção de vários casos de estudo da deformação crustal verificada em vulcões de várias partes do mundo. Um dos objetivos desta tese é comparar a deformação crustal observada no vulcão do Fogo e em outros vulcões do mundo. A

comparação de diferentes episódios pré-eruptivos de deformação observados em diferentes vulcões contribui para alcançar uma visão mais abrangente e esclarecedora acerca dos padrões de deformação mais comuns, possibilitando quer a identificação de algumas semelhanças e diferenças na forma como estes se manifestam, quer a compreensão dos processos magmáticos subjacentes. Desta forma, pretende-se que esta pesquisa se assuma como um contributo valioso para a interpretação cuidada e fundamentada da deformação crustal registada na rede geodésica regional.

Outro objetivo proposto foi o estabelecimento de um sistema automático de processamento dos dados GNSS, para monitorização da deformação crustal a partir das várias estações permanentes já existentes e em funcionamento nos Açores, de modo a associar, no futuro, outras estações GNSS. Com efeito, o objetivo final é que a técnica GNSS seja também utilizada como uma ferramenta de monitorização sismovulcânica, em tempo quase-real.

Além disso, procurou-se conceber um modelo teórico de uma futura rede GNSS dos Açores, perspectivando-o como um documento auxiliar, quer para a sua instalação e manutenção, em termos de equipamentos e *software* utilizados, quer para a utilização dos mesmos. Pretendeu-se, ainda, replicar as boas práticas e procedimentos já existentes e, simultaneamente, fazer uma pesquisa acerca de novos métodos e de equipamentos, que possam melhorar o sistema de monitorização geodésica.

Em síntese, este trabalho de investigação visa melhorar a monitorização da deformação crustal no arquipélago através da automatização do processamento rápido dos dados GNSS. Para o efeito, é necessário adquirir, preparar e processar rapidamente os dados GNSS, de forma a ser possível detetar e analisar, em tempo quase-real, a deformação vulcânica.

O primeiro capítulo corresponde à Introdução, em que são tratadas, de forma sucinta, várias temáticas, nomeadamente os processos tectónicos e magmáticos que ocorrem no interior da Terra responsáveis de forma direta e indireta pela deformação crustal e a monitorização sismovulcânica, com ênfase na monitorização geodésica e na técnica GNSS.

Os resultados da pesquisa realizada sobre os diversos casos de estudo da deformação crustal em vulcões do mundo são apresentados no segundo capítulo, bem como a caracterização do arquipélago dos Açores.

O terceiro capítulo incide sobre os estudos geodésicos já realizados na Região e os seus resultados gerais; são, ainda, apresentadas sugestões de novos procedimentos e

equipamentos utilizados e, ainda, um esboço da estrutura de uma nova rede geodésica que se pretende instalar no futuro. Neste capítulo apresenta-se, também, o sistema de processamento automático dos dados GNSS desenvolvido.

O quarto capítulo é dedicado à discussão dos resultados obtidos.