

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



**Avaliação da Susceptibilidade à Ocorrência de Movimentos de
Massa em Vertentes na Freguesia de Santa Maria Maior, Lisboa:
levantamento e avaliação de locais susceptíveis e medidas de
mitigação**

Vanda Paulino Ferreira

**Mestrado em Geologia do Ambiente, Riscos Geológicos e Ordenamento do
Território**

Relatório de Estágio orientado por:
Professor Doutor Fernando Manuel Silva da Fonseca Marques

2021

Esta tese não segue o novo acordo ortográfico

Agradecimentos

Na realização deste trabalho surgiram inúmeros contributos de pessoas que permitiram torná-lo possível, pelo que, queria exprimir o meu apreço e sincero agradecimento.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Câmara Municipal de Lisboa por me ter proporcionado esta oportunidade e permitir desenvolver um tema numa área científica que tanto gosto e na cidade de Lisboa que tanto estimo. Agradeço também todos os dados e informação que partilharam.

Ao Professor Doutor Fernando Manuel Silva da Fonseca Marques, meu orientador, gostaria de agradecer a orientação, disponibilidade e prestabilidade durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho. Agradeço o conhecimento valioso transmitido, a paciência que teve durante todo o processo e o facto de me permitir desenvolver um tema que eu tanto queria e que considero tão interessante e importante. É sem dúvida uma grande referência, foi um prazer enorme trabalhar e aprender consigo!

À Doutora Cláudia Pinto agradeço toda a ajuda, a partilha de conhecimento e os ensinamentos que me passou durante este tempo. Apesar da impossibilidade de ser orientadora, foi uma ajuda e apoio fundamental nos momentos de maior dificuldade e contribuiu sempre para que o meu trabalho fosse o mais completo e rigoroso possível. Agradeço a forma calorosa como me acolheu na sua equipa, todas as oportunidades que me proporcionou para assistir e contribuir para os seus projectos e disponibilidade que sempre mostrou em me ajudar hoje e no futuro.

À Alexandra Frias e ao Pedro Leonardo agradeço por me acolherem, integrarem e ajudarem em tudo o que foi preciso durante o estágio. Obrigada por todos os ensinamentos, esclarecimentos, apoio e motivação que me deram! Sou muito grata por tudo o que fizeram por mim e da forma carinhosa como sempre me trataram!

À Arquitecta Ana Luísa Seabra e aos restantes elementos da Divisão de Cadastro agradeço a forma calorosa como me receberam, toda a simpatia, alegria e carinho com que me trataram ao longo do estágio. Será uma equipa que irei sempre lembrar pela boa disposição e alegria!

À Professora Doutora Maria da Conceição Freitas e ao Professor Doutor César Andrade agradeço toda a disponibilidade, ajuda e agilização que permitiu a concretização deste estágio.

Aos meus pais e à minha irmã agradeço a oportunidade que me deram, a força que sempre me transmitiram e paciência que tiveram durante este processo! Sou muito grata pela família que tenho, pelo orgulho que sempre demonstraram em mim e por tudo o que me têm proporcionado ao longo destes anos académicos!

À minha restante família, aos que cá estão e que partiram, agradeço todos os ensinamentos, motivação e orgulho que sempre me transmitiram. São e serão sempre parte fundamental da minha vida!

Ao Tiago quero agradecer todo o amor e por ter estado sempre do meu lado nos momentos bons e menos bons deste processo. Foi sem dúvida uma ajuda fundamental para me manter positiva, não perder o foco e não desistir quando as coisas se tornavam mais complicadas ou desanimadoras.

A todas as amigas que cresceram na faculdade, em especial aqueles que me acompanharam durante o mestrado, que me incentivavam, ajudaram e ouviam com entusiasmo os meus feitos agradeço a amizade, força e interesse que sempre demonstraram pelo meu trabalho e sucesso!

Por fim, agradeço a todos os que de alguma forma contribuíram positivamente para este trabalho e que aqui não foram referidos.

Resumo:

O presente trabalho tem por objectivos a determinação da susceptibilidade de movimentos de massa em vertente através da aplicação de métodos de base física, o levantamento e avaliação de zonas susceptíveis e a apresentação de medidas de mitigação, em contexto urbano, para um caso de estudo representado pela freguesia de Santa Maria Maior, Lisboa.

Para a avaliação da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa em vertentes aplicaram-se dois modelos, o modelo *SHALSTAB* de Montgomery e Dietrich (1994) e o modelo do Talude Infinito de Sharma (2002). O primeiro modelo permite a determinação da razão entre a espessura de solo saturado e a espessura de solo potencialmente instável, a qual é variável de entrada no modelo de Sharma (2002). O modelo do Talude Infinito permite a determinação quantitativa da estabilidade das vertentes pela aplicação do método do equilíbrio limite, o qual simula os mecanismos físicos que condicionam a ocorrência destes movimentos superficiais. Como resultado final obtém-se dados de factor de segurança, o qual pode ser representado por classes de susceptibilidade. No final, é necessário proceder à validação do modelo, por comparação com inventários de movimentos, e à avaliação da sua capacidade de previsão.

Os dados de entrada dos modelos, dados geotécnicos, geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos e de precipitação, foram obtidos através da consulta de relatórios geológicos/geotécnicos, hidrogeológicos e em dados publicados. Estes foram sujeitos a vários processos de análise, organização, correlação e retroanálise de modo a obter os valores que melhor descrevem as características das formações geológicas. Ademais, procedeu-se à representação de algumas características da freguesia, as quais permitem conhecer melhor o substrato geológico, o seu comportamento e reconhecer a presença de água.

A campanha de campo realizada teve como objectivo a avaliação das características do edificado presente nas zonas já anteriormente classificadas como susceptíveis. Com estes dados pretende-se inferir se existe uma relação entre as patologias identificadas no edificado e a ocorrência de instabilidade de solos, para que depois sejam propostas várias medidas de mitigação.

Com este trabalho foi possível comprovar que os modelos utilizados podem ser aplicados a zonas urbanizadas, tendo apresentado uma capacidade de previsão aceitável, com valor de AAC de 0,8. O mapa de susceptibilidade permite evidenciar algumas zonas com susceptibilidade elevadas, estando estas concentradas, em maior quantidade, na colina do Castelo e em torno da colina de São Roque. Correlacionando estas conclusões com os dados da campanha de campo, pode considerar-se que este tipo de análise do edificado permite inferir a ocorrência de instabilidade, sendo uma mais valia neste tipo de avaliações.

Palavras-chave: Movimentos de vertente; Susceptibilidade; Talude Infinito; Edificado e patologias estruturais; Mitigação.

Abstract:

The present work has as main goals the determination of the susceptibility of landslides through the application of physical based methods, the identification and evaluation of susceptible areas and the presentation of mitigation measures, at an urban context, represented by the parish of Santa Maria Maior, Lisbon case study.

To evaluate the susceptibility of the occurrence of landslides, two models were applied, the hydrological model, *SHALSTAB* by Montgomery and Dietrich (1994), and the geological model of “Infinite Slope” Sharma's (2002). The first model allows the determination of the ratio between the thickness of saturated soil and the thickness of potentially unstable soil, which is an input variable in the geological model. The geological model allows the quantitative determination of the slope stability by applying the limit equilibrium method, which simulates the physical mechanisms that condition the occurrence of surface movements. As a final result, safety factor data are obtained, which can be reclassified to represent susceptibility classes. In the end, it is necessary to proceed with the validation of the model by comparison with movement inventories and the evaluation of its prediction capacity.

The input data of the models, geotechnical, geological, hydrogeological, geomorphological and precipitation data, were obtained by analysis of geological/ geotechnical and hydrogeological reports and published data. These went through several processes of analysis, organization, correlation and back analysis in order to obtain the values that best describe the characteristics of the geological formations. In addition, some characteristics of the parish were represented, which allow a better understanding of the geological substrate, its behaviour and the presence of water.

The field work consisted of assessing the characteristics of the building present in areas previously classified as susceptible. With these data it is intended to infer whether there is a relationship between the pathologies identified in the building and the occurrence of soil instability. So that several risk mitigation measures are then proposed.

With this work it was possible to prove that the models used can be applied to urbanized areas, having an acceptable forecasting capacity, with AAC value of 0,8. The susceptibility map allows evidence of some areas with high susceptibility, which are concentrated, in greater quantity, on the hill of Castelo and around the hill of São Roque. Correlating these conclusions with the data from the field work, it is possible to consider that this type of analysis of the building allows to infer the occurrence of instability, being an asset in this type of evaluations.

Key-words: Landslides; Susceptibility; Infinite Slope Model; Buildings and structural pathologies; Mitigation.

Índice de Conteúdos:

1. Introdução.....	1
1.1. Âmbito.....	1
1.2. Enquadramento Geral.....	1
1.3. Objectivos.....	3
2. Fundamentos Teóricos.....	4
2.1. Causas dos Movimentos de Vertentes.....	5
2.2. Avaliação da Susceptibilidade.....	6
2.3. Modelos de Avaliação da Susceptibilidade.....	6
2.3.1. Modelo Geológico: Modelo do Talude Infinito.....	8
2.3.2. Modelo Hidrológico: SHALSTAB.....	9
2.4. Precipitação.....	10
3. Enquadramentos da Área de Estudo.....	12
3.1. Enquadramento Geográfico.....	12
3.2. Enquadramento Geológico.....	12
3.3. Enquadramento Geomorfológico.....	16
3.4. Enquadramento Hidrogeológico.....	18
3.5. Enquadramento Hidrológico.....	21
4. Campanha de Campo.....	25
4.1. Dados Recolhidos.....	25
4.2. Resultados.....	26
4.2.1. Edificado.....	29
4.2.2. Edificado vs. Geologia.....	31
4.2.3. Muros de Suporte.....	34
5. Relatórios Geológicos e Hidrogeológicos.....	35
5.1. Níveis de Água.....	35
5.1.1. Distribuição dos Níveis de Água.....	36
5.1.2. Níveis de Água vs. Precipitação.....	37
5.2. Depósitos de Cobertura.....	38
5.3. Zonamento Geotécnico.....	39
5.4. Resistência à Penetração Dinâmica.....	40
5.4.1. Valores de N_{SPT} até à profundidade de 3m.....	40
5.4.2. Valores N_{SPT} entre os 3 e 5m de profundidade.....	41
5.4.3. Valores N_{SPT} entre 5 e 10m de profundidade.....	42
5.4.4. Valores de N_{SPT} entre os 10 e 15m de profundidade.....	43

5.4.5.	Varição Geral em Profundidade	44
5.5.	Variáveis Geológicas	44
5.5.1.	Peso Específico do Solo	44
5.5.2.	Coesão e Ângulo de Atrito interno	45
5.6.	Variáveis Hidrogeológicas	45
6.	Precipitação	46
6.1.	Precipitação Efectiva	46
7.	Ocupação e Uso do Solo	48
7.1.	Factor de Infiltração.....	49
8.	Área de Contribuição a Montante	50
9.	Espessura de Solo Potencialmente Instável	50
10.	Cálculo da Susceptibilidade	53
10.1.	Variável m (razão entre a espessura de solo saturado e a espessura de solo potencialmente instável).....	53
10.2.	Mapa de Susceptibilidade	54
10.3.	Validação do Modelo.....	56
10.3.1.	Inventário.....	56
10.3.1.1	. Inventários de Movimentos e de Campo	56
10.3.2.	Curva ROC e AAC	57
10.3.3.	Validação do Modelo	58
11.	Cartografia de Susceptibilidade Final	60
12.	Indícios de Deformação.....	62
13.	Medidas de Mitigação	65
14.	Discussão de Resultados e Conclusão	68
15.	Considerações Finais.....	71
16.	Referências	73
17.	Anexos	80

Índice de Figuras:

Figura 2.1: Representação de uma superfície do talude infinito para solos coesivos, com fluxo de água paralelo à superfície (Adaptado de Sharma (2002)).	8
Figura 2.2: Enquadramento Geográfico da área de estudo. Localização da Freguesia de Santa Maria Maior no Concelho de Lisboa e em Portugal Continental (coordenadas ETRS89 Portugal TM06, Basemap World Ocean Base e World Topographic Map).[2.8]	11
Figura 3.1: Enquadramento Geográfico da área de estudo. Localização da Freguesia de Santa Maria Maior no Concelho de Lisboa e em Portugal Continental (coordenadas ETRS89 Portugal TM06, Basemap World Ocean Base e World Topographic Map).	12
Figura 3.2: Enquadramento Geológico da Freguesia de Santa Maria Maior (Layer de Geologia da CML, escala 1:10 000, ETRS89 TM06, créditos LENG).	13
Figura 3.3: Perfis geológicos da área de estudo. Perfil A, orientação NW-SE, estende-se desde a margem do rio Tejo, passando pela Colina do Castelo e terminando no Martim Moniz. Perfil B, orientação WNW-ESE, estende-se da Colina do Castelo, passando pelo Esteiro da Baixa e terminando na Colina de São Roque. Localização no Anexo 1.	16
Figura 3.4: Mapa topográfico da área de estudo.	17
Figura 3.5: Mapa de declives da área de estudo.	18
Figura 3.6:A) Localização das Unidades Hidrogeológicas de Portugal Continental e da zona de estudo. A amarelo encontra-se representado o Maciço Antigo, a rosa a Ola Mesocenozóica Ocidental, a azul a Bacia Terceária do Tejo e a verde a Bacia Mesocenozóica Meridional; B) Localização da Orla Ocidental Indiferenciada da Bacia do Tejo, a rosa, e localização de Lisboa (Adaptado de SNIRH e de Monteiro & Salvador (2012)).	19
Figura 3.7: Sistemas hidrogeológicos na área de estudo (dados CML, escala 1:10 000, ETRS 89 TM06).	20
Figura 4.1: Distribuição das zonas identificadas como susceptíveis à ocorrência de movimentos de massa em vertentes pela CML, utilizadas para a orientação das campanhas de campo.	25
Figura 4.2:Distribuição do edificado e dos muros de suporte analisados e descritos durante a campanha de campo (representados a azul), com pormenor para a localização das zonas consideradas susceptíveis pela CML.	26
Figura 4.3: Gráfico com a distribuição dos valores referentes ao estado de conservação da fachada principal do edificado, segundo os dados sintetizados na Tabela 4.1	29
Figura 4.4: Gráfico com a distribuição dos valores referente à existência ou ausência de intervenções/alterações recentes reconhecíveis nas fachadas principais, segundo os dados sintetizados na Tabela 4.1.	29
Figura 4.5: Distribuição das classes de patologias identificadas em cada edifício durante o trabalho de campo e a sua localização sobre a geologia da área de estudo.	30
Figura 4.6: Gráfico com a distribuição das principais classes de patologias estruturais identificadas nos edifícios observados durante a campanha de campo, com base nos parâmetros sintetizados na Tabela 4.1.	31
Figura 4.7: Gráfico com a contabilização do número de patologias estruturais incidentes num mesmo edifício.	31
Figura 4.8: Gráfico com estado de conservação da fachada principal distribuído consoante a formação geológica sobre a qual se localiza o edificado. A verde destaca-se os dados das fachadas em bom estado, a laranjas de fachadas em estado médio e a vermelho as fachadas em deficiente estado de conservação. O nome das formações geológicas encontra-se descrito abaixo de cada conjunto de dados.	32

Figura 4.9: Gráfico com a distribuição do edificado quanto à existência de intervenções/ alterações recentes tendo em conta o substrato geológico sobre o qual estão posicionados. Representado a cor verde encontram-se os edifícios com intervenções/ alterações evidentes e a laranja os edifícios sem indícios de intervenções. O nome das formações geológicas encontra-se descrito abaixo de cada conjunto de dados.	33
Figura 4.10: Gráfico com a distribuição das classes de patologias identificadas em cada edifício durante o trabalho de campo e a sua localização sobre a geologia da área de estudo. A amarelo encontrasse representada a Classe I (fissuras), a laranja a Classe II (empolamento, fendas, reboco em desagregação e pavimentos desnivelados), a vermelho a Classe III (assentamento, fendas com desaprumo da fachada e desagregação do material de alvenaria) e a verde a quarta classe (sem patologias) de patologias estruturais. O nome das formações geológicas encontra-se descrito abaixo de cada conjunto de dados.	33
Figura 4.11: Distribuição dos muros observados durante a campanha de campo e identificação das patologias estruturais dominantes descritas. Destaque para a sua posição relativamente à localização das zonas de susceptibilidade identificadas pela CML.	34
Figura 5.1: Localização dos níveis de água detectados nas sondagens realizadas na freguesia, com a identificação da profundidade à qual o primeiro nível foi encontrado. Destaque para a delimitação das formações geológicas de aterros/ aluviões.	36
Figura 5.2: Gráfico com a distribuição dos primeiros níveis de água detectados na área de estudo, agrupados em classes.	37
Figura 5.3: Distribuição da espessura dos depósitos de cobertura (aterros e aluviões) ao longo da área de estudo. Destaque para a delimitação da formação de aterros/ aluviões, segundo o enquadramento geológico.	38
Figura 5.4: Gráfico com a distribuição da profundidade até à qual se prolongam os materiais de cobertura na área de estudo, organizada em classes.	38
Figura 5.5: Gráfico com a distribuição da profundidade à qual foram detectados solos com valor de N_{SPT} menor ou igual a 10, agrupados em classes.	39
Figura 5.6: Distribuição dos valores de NSPT à profundidade de 3m. Destaque para a delimitação dos limites geológicos da área de estudo.	40
Figura 5.7: Gráfico com a distribuição em classes dos valores de N_{SPT} medidos à profundidade de 3m.	40
Figura 5.8: Distribuição dos valores de NSPT à profundidade de 3 a 5m. Destaque para a delimitação dos limites geológicos da área de estudo.	41
Figura 5.9: Gráfico com a distribuição em classes dos valores de N_{SPT} medidos à profundidade de 3 a 5m.	41
Figura 5.10: Distribuição dos valores de NSPT à profundidade entre os 5 e os 10m. Destaque para a delimitação dos limites geológicos da área de estudo.	42
Figura 5.11: Gráfico com a distribuição em classes dos valores de N_{SPT} medidos à profundidade de 5 a 10m.	42
Figura 5.12: Distribuição dos valores de NSPT à profundidade entre os 10 e os 15m. Destaque para a delimitação dos limites geológicos da área de estudo.	43
Figura 5.13: Gráfico com a distribuição em classes dos valores de N_{SPT} medidos à profundidade de 10 a 15m.	43
Figura 7.1: Distribuição dos diferentes usos e ocupação do solo na área de estudo.	48
Figura 7.2: Distribuição dos valores referentes ao factor de infiltração (fi) ao longo da área de estudo, consoante a classificação do uso e ocupação do solo.	49
Figura 8.1: Distribuição dos valores referentes à área de contribuição a montante da área de estudo.	50

Figura 9.1: Distribuição da espessura de solo potencialmente instável na área de estudo. Destaque para a delimitação dos limites geológicos das formações.....	52
Figura 10.1: Distribuição da cartografia do variável m obtida pela aplicação do modelo hidrológico SHALSTAB, para 1 dia de precipitação e com valor máximo limitado a 1,5m.....	54
Figura 10.2: Cartografia do factor de segurança, para um cenário de 1 dia de precipitação acumulada, por meio da aplicação do modelo geológico do Talude Infinito de Sharma (2002).	55
Figura 10.3: Localização dos inventários de movimentos e de campo, a preto destaque para o inventário de movimentos ocorridos e a azul escuro o inventário realizado com base nos indícios no edificado.....	57
Figura 10.4: Curva ROC de predição para a avaliação dos resultados do modelo de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa em vertentes para cenário de 1 dia de precipitação acumulada, utilizando o inventário de movimentos ocorridos. Destaque para o valor de AAC.....	58
Figura 11.1: Cartografia de susceptibilidade final da ocorrência de movimentos de massa em vertentes, para o cenário de 1 dia de precipitação acumulada. Os valores de factor de segurança podem ser agrupados em classes de susceptibilidade, onde a vermelho está representada a classe muito alta, a laranja a classe alta, a amarelo a moderada, a verde claro a baixa e, por fim, a verde escuro a classe de susceptibilidade muito baixa.	60
Figura 11.2: Mapa com comparação da cartografia de susceptibilidade obtida pelo modelo aplicado e a cartografia pré-existente da CML.....	61
Figura 12.1: Mapas com a distribuição do factor de segurança e patologias estruturais identificadas durante a campanha de campo nos edifícios, na área Oeste da freguesia, Colina de São Roque.	62
Figura 12.2: Mapas com a distribuição do factor de segurança e patologias estruturais identificadas no edificado observado na campanha de campo, para a zona norte e a oeste da colina do Castelo.	63
Figura 12.3: Mapa com a distribuição do factor de segurança e das patologias estruturais identificadas nos edifícios observados na campanha de campo, para a zona Sul - Sudeste da Colina do Castelo.....	63

Lista de Abreviaturas:

AAC - Área abaixo da Curva;

CML – Câmara Municipal de Lisboa;

CodSIG – Códigos de identificação únicos dos objectos do espaço urbano- Câmara Municipal de Lisboa;

FFP - Fracção de Falsos Positivos;

FS – Factor de Segurança;

FVP - Fracção de Verdadeiros Positivos;

GeoSIG – Aplicação de Gestão de Dados Geológicos, Geotécnicos e Hidrogeológicos;

IDL – Instituto Dom Luiz;

MDT – Modelo Digital de Terreno;

ROC - *Receiver Operating Characteristic*;

SHALSTAB – *Shallow Slope Stability Model*;

SIG – Sistemas de Informação Geográfica;

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos;

SPT- *Standard Penetration Test*;

UL – Universidade de Lisboa.

Lista de Símbolos:

$(L_{si} - L_i)$ – Amplitude de classes;

a – Área de contribuição a montante;

a_i – Valor da ordenada correspondente a L_i ;

b – Largura da unidade de terreno (pixel);

b_i – Valor da ordenada correspondente a L_{si} ;

c' – Coesão efetiva;

Cr – Precipitação acumulada;

D – Duração;

dw, h – Espessura de solo saturado;

E – Elementos de risco;

fi – Factor de infiltração;

FS – Factor de Segurança;

H – Perigosidade natural;

h, z – Espessura de solo potencialmente instável;

K – Coeficiente de permeabilidade;

Ks – Conductividade hidráulica saturada;

m – Razão entre a espessura de solo saturado e a espessura de solo potencialmente instável;

q, Q – Precipitação efetiva;

Ri – Intensidade da precipitação;

Rs – Risco específico;

Rt – Risco total;

S – Susceptibilidade;

T – Transmissividade;

V – Vulnerabilidade;

w – Humidade;

β, θ – Declive da vertente;

γ, ρ_s – Peso volúmico/ específico natural do solo;

γ_{sat} – Peso volúmico/ específico saturado do solo;

γ_{sub} – Peso volúmico/ específico submerso do solo;

ϕ' – Ângulo de atrito interno efetivo.

1. Introdução

1.1. Âmbito

O presente trabalho foi desenvolvido em contexto de Estágio Curricular com duração de nove meses, decorrente no período compreendido entre 3 de Junho de 2019 e 28 de Fevereiro de 2020, realizado na Câmara Municipal de Lisboa (CML).

O estágio foi realizado na Divisão de Cadastro, estrutura orgânica integrada no Departamento de Administração do Património da Direcção Municipal de Gestão Patrimonial, sob supervisão da Geóloga Dr.^a Cláudia Pinto. A Divisão de Cadastro é gerida pela Arquitecta Ana Luísa Seabra e é responsável por: coordenar a execução das atividades de suporte à consolidação do cadastro integrado do Município de Lisboa; assegurar a elaboração e atualização sistemática da cartografia digital e temática; promover o desenvolvimento do sistema de informação geográfica e cadastro do Município; assegurar a disponibilização da informação geográfica e cadastro do Município aos serviços municipais e a particulares; entre outros.

Durante a fase que se realizou na CML executaram-se as seguintes tarefas: recolha e tratamento de dados obtidos em campanhas de campo; recolha, sistematização e análise de dados patentes nos relatórios geológicos/ geotécnicos e hidrogeológicos disponíveis na base de dados GeoSIG; obtenção das variáveis de entrada nos modelos hidrogeológico e geológico. Além da informação geológica, foi ainda obtido um conjunto diversificado de informação relativa à Freguesia de Santa Maria Maior, designadamente informação geográfica sobre o edificado, rede viária, espaços verdes, geologia, etc., informação base a considerar em diversos estudos ou projectos.

1.2. Enquadramento Geral

Os movimentos de massa em vertentes são um dos perigos naturais que geram enormes danos, provocando perdas monetárias, feridos e mortos todos os anos por todo o mundo (Dai *et al.*, 2002). O aumento da população encontra-se, quase invariavelmente, relacionado com a intensa exploração do solo, para o desenvolvimento de urbanizações e estruturas de apoio, a qual muitas das vezes ocorre em zonas instáveis ou potencialmente instáveis. Este crescimento da população sobre estas áreas perigosas leva ao aumento do impacto de deslizamentos (Guzzetti, 2005).

Os movimentos de vertentes, movimento de uma massa de rocha, detritos ou terra ao longo de uma vertente sob influência da gravidade (Cruden, 1991), podem ser desencadeados por inúmeros factores que promovam o aumento da tensão cisalhante (ou tangencial) ou ao decréscimo da resistência ao cisalhamento (resistência ao corte) dos materiais (Dai *et al.*, 2002). Deste modo, a instabilidade pode ser considerada o produto das características geomorfológicas, geológicas e hidrogeológicas dos materiais e das alterações destas condições por processos geodinâmicos e humanos (Soeters & Van Westen, 1996). Os movimentos, podem assim, ocorrer em quase todos os tipos de terreno desde que as condições necessárias para o seu desencadeamento estejam presentes (Harold & Liang, 1978).

Para o meio urbano, Vasconcelos e Marques (2011), descrevem que a avaliação do perigo de movimentos tem uma grande relevância, mas é uma tarefa particularmente difícil. O facto de o solo apresentar uma grande área construída com alterações topográficas significativas, promove a diminuição da qualidade e fiabilidade dos dados finais. Para além de que, dificulta toda a avaliação dos efeitos de reforço ou instabilidade que o edificado promove, a avaliação da distribuição espacial da infiltração e

também na compilação de mapas geológicos detalhados. Isto torna o estudo e o desenvolvimento de cartografia de susceptibilidade extremamente importante na actualidade (Vasconcelos, 2011).

Tendo em conta o contexto referido acima, é necessário que a avaliação da instabilidade seja feita por meio da avaliação da susceptibilidade das áreas urbanas, com o desenvolvimento de mapas onde se identifiquem as áreas com potencial de ocorrência de movimentos. A avaliação da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa em vertentes baseia-se em três princípios fundamentais (Varnes, 1984; Carrara *et al.*, 1991; Hutchinson, 1995; Guzzetti, 2005, Vasconcelos, 2011; Sobral, 2018; Melo, 2018): 1) os movimentos de vertentes podem ser reconhecidos, classificados e cartografados; 2) as condições que causam instabilidade podem ser identificadas, registadas e utilizadas para a construção de modelos preditivos; 3) a ocorrência de movimentos de massa em vertente pode ser espacialmente inferida. Por conseguinte, assume-se que futuros movimentos terão maior probabilidade de ocorrer em áreas onde as condições geológicas e geomorfológicas são semelhantes aquelas que, no passado, originaram instabilidade (Guzzetti *et al.*, 1999; Melo, 2018).

A susceptibilidade pode ser descrita como a possibilidade de um determinado fenómeno natural ocorrer, numa determinada área, tendo em conta as condições do terreno (Brabb, 1984; Guzzetti, 2005). Os modelos preditivos podem ser baseados em diversos métodos, sendo os mais importantes para este trabalho os métodos indirectos e quantitativo de base física.

Os métodos quantitativos baseiam-se em regras físicas, matemáticas e estatísticas produzindo cartografia rigorosa (Aleotti, 1999). Dentro destes métodos, a susceptibilidade pode ser determinada a partir da análise da relação espacial entre os movimentos e os factores de predisposição com potencial influência na sua ocorrência (Vasconcelos, 2011; Sobral, 2018), métodos estatísticos, ou por parâmetros e dimensões físicas que procuram explicar a ocorrência de movimentos através de princípios físicos (Aleotti, 1999; Guzzetti, 2005; Vasconcelos, 2011), métodos de base física (Pimenta, 2011). Estes últimos, utilizam um modelo de análise de estabilidade, geralmente o modelo do Talude Infinito, acoplado a modelos hidrológicos simples, estáticos ou dinâmicos (Sobral, 2018). A sua aplicação implica o conhecimento dos parâmetros geotécnicos e hidrológicos do terreno (Melo, 2018) e permite obter o factor de segurança (FS), que relaciona as forças resistentes e instabilizadoras que contribuem para a estabilidade do solo (Guzzetti, 2005; Vasconcelos, 2011). Os dados obtidos devem ser validados recorrendo a inventários e, finalmente, reclassificados de modo a obter um mapa de susceptibilidade.

É importante referir que, os métodos utilizados para a obtenção da susceptibilidade, fornecem apenas informação sobre a distribuição espacial das áreas mais ou menos propensas à ocorrência de movimentos de vertente. Neste contexto, a cartografia de susceptibilidade é utilizada como produto final de indiscutível utilidade para a avaliação do risco e ordenamento do território (Melo, 2018), permitindo a diminuição dos efeitos que este evento perigoso pode ter nos elementos de risco (Glade *et al.*, 2005). A este processo designamos de mitigação, a qual assume um papel extremamente importante nas zonas urbanizadas onde existem mais elementos sujeitos a estes fenómenos danoso, pelo que é aconselhável o desenvolvimento de medidas de mitigação adequadas e eficazes na diminuição dos seus impactos. Inúmeros autores têm desenvolvido abordagens para estes problemas ao longo dos anos (por exemplo, Abramson *et al.*, 2002; Vallejo *et al.*, 2002; Dai *et al.*, 2002; Zêzere, 2005; Di martine *et al.*, 2012) apresentando em comum algumas medidas de mitigação como, por exemplo: a avaliação do risco e desenvolvimento de sistemas de monitorização; regulamentação de planeamento de uso e ocupação de zonas instáveis; implementação de medidas físicas de estabilização e prevenção; desenvolvimento de sistemas de alerta e aviso; sensibilização da população.

Na região de Lisboa são conhecidas diversas zonas que, ao longo do tempo, tem sido alvo de eventos de instabilidade devido a existência de um conjunto de condições propícias à sua ocorrência,

sejam estas de natureza geológica, geotécnica, geomorfológica, climática ou hidrogeológica. A maioria dos movimentos apresenta episódios de precipitação intensa e/ou prolongada como factores desencadeantes, sendo responsáveis por inúmeros danos materiais e humanos (Zêzere, 2001; Pimenta, 2011). Quaresma (2008) realizou um estudo na região de Lisboa, onde avalia os efeitos sociais de 77 eventos de instabilidade ocorridos entre 1900 e 2006. Verifica-se que, destes 77 eventos, a maioria ocorreu na zona a Norte de Lisboa. No entanto, das 142 mortes resultantes, 36 foram registadas na Grande Lisboa (a maioria das vítimas mortais). Este facto terá levado vários autores (Zêzere *et al.*, 1999, 2004, 2008; Zêzere, 1997; Garcia, 2002; Piedade, 2009; Piedade *et al.*, 2011; Vasconcelos, 2011; Pimenta, 2011; Garcia, 2012; Melo, 2018; Sobral, 2018) a estudarem esta problemática por toda a região de Lisboa, identificando zonas instáveis, factores condicionantes, fazendo previsões de áreas potencialmente afectadas por futuros movimentos e mitigando os riscos dos mesmos.

Este estudo revela-se assim importante para o melhoramento do mapa de susceptibilidade da área de estudo, para a identificação de zonas instáveis e para a implementação de medidas de mitigação que diminuam danos e perdas associadas a movimentos de massa em vertente na Freguesia de Santa Maria Maior. Tendo em conta que é elaborado num contexto urbano, o estudo permitirá evidenciar se o modelo aplicado é adequado a este tipo de estudos e se o levantamento do edificado poderá ser um método de identificação de zonas instáveis.

1.3. Objectivos

No contexto deste relatório, o principal objectivo consiste no desenvolvimento de um mapa de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa em vertente para a freguesia de Santa Maria Maior, Lisboa. Para este fim, foi utilizado um método de base física, que incorpora um modelo geológico de análise de estabilidade acoplado com modelo hidrogeológico. O modelo utilizado foi o modelo do Talude Infinito de Sharma (2002), que permite a análise da instabilidade de vertentes utilizando o método do equilíbrio limite, para o cálculo do factor de segurança (FS). Por sua vez, calculou-se a componente hidrogeológica do modelo *SHALSTAB* de Montgomery & Dietrich (1994), que possibilita a determinação da razão entre a espessura de solo saturado e a espessura de solo potencialmente instável, para um cenário de precipitação intensa.

Após aplicação de ambos os modelos e a obtenção do valor do FS para cada pixel, procede-se à validação do modelo com recurso aos inventários e realiza-se a curva ROC e o cálculo da AAC (Bi & Bennett, 2003). Com estes dados, é possível verificar a capacidade de predição do modelo adoptado e, se os valores de AAC não forem satisfatórios, proceder a uma nova recalibração dos dados. Posto isto, é possível proceder à identificação de zonas instáveis e, após reclassificação dos valores do FS, à classificação das zonas susceptíveis à ocorrência de movimentos de massa em vertente.

Como objectivos secundários, surge o levantamento e análise do edificado presente nas zonas potencialmente instáveis e a sugestão de medidas de mitigação. Para o primeiro ponto, realizou-se campanhas de campo nas quais se procedeu à análise do edificado e muros de suporte. Posteriormente, com a conjugação de toda a informação obtida, foram propostas medidas de mitigação, com base na análise da susceptibilidade e das zonas onde os indícios nas estruturas podem indicar instabilidade dos solos.

O objectivo final será, paralelamente aos anteriores, perceber se a aplicação deste modelo de base física é adequada a um contexto urbano, fortemente alterado pelas actividades antropogénicas, assim como avaliar se os dados recolhidos na campanha de campo, refletem e podem ser indicadores da instabilidade do solo, permitindo a identificação de locais potencialmente instáveis.

2. Fundamentos Teóricos

Ao longo dos anos foram descritas na literatura científica várias classificações de movimentos de massa em vertente. Varnes (1978) destaca-se de entre muitos autores por ter desenvolvido uma das classificações mais utilizadas para esta temática em língua Inglesa (Varnes, 1954; Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996; Hungr *et al.*, 2014).

A classificação de Varnes (1978) é baseada em dois factores principais, o tipo de movimento e o tipo de material em que este ocorre. Este autor, divide os movimentos em cinco tipos: quedas (“*falls*”); tombamentos (“*topples*”); deslizamentos (“*slides*”); expansões laterais (“*spreads*”); fluxos (“*flows*”). E utiliza um sexto, os movimentos complexos (“*complex*”), que inclui os movimentos que englobam dois ou mais dos movimentos descritos anteriormente.

Relativamente ao material onde estes movimentos podem ocorrer, considerou dois materiais principais: rocha (“*rock*”); solo (“*soil*”). Em Cruden & Varnes (1996), os autores definem “rocha” como massa firme e dura, intacta e posicionada no seu lugar natural antes do início do movimento. Os solos foram divididos em 2 materiais diferentes, os detritos (“*debris*”) e terra (“*earth*”), em que a sua diferença será a granulometria dominante. O “solo” é um agregado de partículas, minerais e rochas, que foram transportadas ou formadas como consequência da alteração das rochas no local, e que apresentam os poros ou parte deles preenchidos por gases e líquidos. Destes solos, os “detritos” serão compostos por 20 a 80% de partículas maiores que 2mm e as restantes menores que 2mm. As “terras” serão compostas por mais de 80% de partículas com menos de 2mm.

Na Tabela 2.1 encontra-se sintetizada a classificação de Varnes (1978), com adição de informação sobre a velocidade com que os movimentos podem ocorrer. A velocidade do movimento é também um parâmetro importante na descrição do movimento, pois pode ser associada ao grau de destruição que o movimento pode provocar (Cruden & Varnes, 1996) (Tabela 2.2).

Tabela 2.1: Classificação dos movimentos de massa em vertentes de Varnes (1978), com base no tipo de material (Adaptado de Varnes (1978)).

Tipo de Movimento		Tipo de Material		
		Maciço Rochoso	Solos Grosseiros	Solos Finos
Quedas		Queda de Blocos	Queda de Detritos	Queda de terras
Tombamento		Tombamento de Blocos	Tombamento de detritos	Tombamento de terras
Deslizamentos	Rotacional	Deslizamento de Blocos	Deslizamento de detritos	Deslizamentos de terras
	Translacional			
Expansão lateral		Expansão de Blocos	Expansão de detritos	Expansão de Terras
Fluxos		Fluxo de blocos	Fluxo de detritos	Fluxo de terras
Complexos		Combinação de dois ou mais movimentos		

Tabela 2.2: Relação entre a classe de movimentos de vertentes, a velocidade do movimento e o grau de destruição associado (Adaptado de Cruden & Varnes (1996)).

Classe de Velocidades	Descrição	Velocidade (mm/s)	Velocidade Típica	Destruição Significativa Provável
7	Extremamente rápido	5×10^3	5 m/s	Acidente muito violento; edifícios destruídos pelo impacto do material deslocado; várias mortes.
6	Muito rápido	5×10^1	3 m/s	Perda de algumas vidas; velocidade demasiado elevada para permitir o salvamento de toda a população.
5	Rápido	5×10^{-1}	1.8 m/s	Possível evacuação; destruição de estruturas, equipamentos e bens.
4	Moderado	5×10^{-3}	13 m/mês	Algumas estruturas temporárias e sensíveis podem ser mantidas temporariamente.
3	Lento	5×10^{-5}	1.6 m/ano	Possível remediação das construções durante o movimento; estruturas sensíveis podem ser mantidas, durante uma fase de aceleração em que o movimento não seja grande.
2	Muito lento	5×10^{-7}	16 mm/ano	Algumas estruturas permanentes não são afectadas pelo movimento.
1	Extremamente lento			Movimento imperceptível sem recurso a instrumentos; Construção possível com precauções.

Cruden e Varnes (1996) realizaram alterações à classificação proposta por Varnes (1978), deixando os movimentos complexos de ser considerados um tipo de movimento principal, tornando-se numa subclasse de cada movimento. Com base no movimento dominante, os autores apresentam as definições e características de cada movimento complexo. Para além destas alterações, estes autores definiram o “Grau de Actividade” dos movimentos, descrevendo o seu estado como: activo; reactivo; suspenso; inactivo. E ainda, descreveram os parâmetros de caracterização do primeiro e segundo movimento, com base nas suas velocidades, conteúdo em água, material e a tipologia de movimento.

Mais recentemente, Hungr *et al.* (2014) propuseram novas alterações à classificação de Varnes (1978). Estas tiveram como objectivo a modificação do tipo de material onde se desenvolvem os movimentos, tornando compatíveis as terminologias geotécnicas e geológicas. Esta classificação apresenta, por isso um maior pormenor quanto ao tipo de material em que ocorrem os movimentos, destacando-se: rocha (“*rock*”); argila (“*clay*”); silte argiloso (“*mud*”); silte (“*silt*”); areia (“*sand*”); cascalheira (“*gravel*”); blocos de rocha (“*boulders*”); detritos (“*debris*”); turfa (“*peat*”); gelo (“*ice*”).

2.1. Causas dos Movimentos de Vertentes

Varnes (1978), indica que os processos envolvidos nestes movimentos reúnem uma série continua de eventos desde a causa até ao efeito. Os movimentos de vertente são processos complexos que podem ser originados como consequência de uma grande variedade de causas e factores (Varnes, 1978; Marques, 2008). Cruden & Varnes (1996), agrupam as principais causas em geológicas, morfológicas, físicas e antrópicas/ humanas. Dentro destes grupos de causas destacam vários processos e fenómenos que podem promover as condições necessárias para a ocorrência de instabilidade, tais como o aumento da tensão de cisalhamento, a baixa resistência dos materiais que compõem as vertentes ou a diminuição da resistência dos materiais ao cisalhamento.

No âmbito da zona de estudo, que se encontra fortemente urbanizada, e com base nos processos descritos por Cruden & Varnes (1996), as causas derivam de factores geológicos como: a resistência

dos materiais à erosão; a existência de fissuras e descontinuidades; contraste de permeabilidade; e a degradação progressiva das características de resistência dos materiais. Referente à morfologia pode destacar-se: a ocorrência de erosão fluvial; erosão subterrânea; alteração dos declives naturais; e modificação da forma das vertentes. De causas físicas, dentro dos factores naturais, destacam-se (Cruden & Varnes, 1996; Marques, 2008): a ocorrência de chuvas intensas e concentradas no tempo; chuvas abundantes e prolongadas no tempo; actividade sísmica; inundações. Por fim, a nível antrópico as causas recaem sobre intervenções como: escavações; remoção do suporte de vertente; sobrecarga do topo das vertentes; irrigação; fugas de água de canalizações.

As causas apresentadas não são as únicas que podemos associar à ocorrência deste fenómeno em meio urbano, mas são as causas mais usais e que, a longo prazo, levam a que as condições para a ocorrência de ruptura se registem.

2.2. Avaliação da Susceptibilidade

Tendo o trabalho como objectivo final a avaliação da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa em vertente torna-se importante definir os conceitos base que constituem o modelo conceptual de risco.

Pelos conceitos publicados por Varnes (1984) e Guzzetti (2005):

- **Susceptibilidade (S)**, é a possibilidade de um determinado fenómeno natural ocorrer numa determinada área com base nas condições do terreno. (Brabb, 1984; Guzzetti, 2005);
- **Risco Total (Rt)**, número de mortos e feridos expectáveis e danos materiais, directos e indirectos, devido à ocorrência de um fenómeno natural particular. O risco total pode ser representado pela Expressão. 2.1:

$$Rt = (E)(Rs) = (E)(H \times V) \quad [2.1]$$

- **Elementos em risco (E)**, são a população, infraestruturas, actividades económicas, entre outros elementos que se encontram em risco numa dada área;
- **Risco Específico (Rs)**, é o grau de perda expectável devido à ocorrência de um fenómeno natural. Este pode ser estimado pelo produto da perigosidade natural pela vulnerabilidade;
- **Perigosidade Natural (“Natural Hazard”) (H)**, é a probabilidade de ocorrência de um fenómeno potencialmente danoso de determinada magnitude, num determinado período de tempo e numa dada área (Guzzetti *et al.*, 2005);
- **Vulnerabilidade (V)**, consiste no grau de perda expectável de um elemento ou conjunto de elementos em risco, resultante da ocorrência de um fenómeno natural de determinada magnitude.

2.3. Modelos de Avaliação da Susceptibilidade

Para a avaliação da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa em vertentes assume-se que a previsão de futuros movimentos é possível, uma vez que os movimentos terão maior probabilidade de ocorrer em áreas onde as condições geológicas e geomorfológicas são semelhantes aquelas que, no passado, originaram instabilidades (Guzzetti *et al.*, 1999).

Os modelos preditivos para a avaliação da susceptibilidade, podem ser baseados em métodos diferentes, sendo os mais comuns, métodos de cartografia directa e indirecta e métodos qualitativos e

quantitativos (Hutchinson, 1995; Soeters & van Westen, 1996; Aleotti & Chowdhury, 1999; Guzzetti *et al.*, 1999; Guzzetti, 2005; Zêzere, 2005). Com o objectivo de avaliar a susceptibilidade à escala da freguesia utilizou-se um método de cartografia indirecta, quantitativo e de base física ou determinístico.

Os métodos de cartografia indirecta baseiam-se nos factores, mecanismos e causas que levam ao desencadeamento da instabilidade geomorfológica, cuja influência é determinada por meio da aplicação de métodos matemáticos de base estatística ou de base física/ determinísticos (Montgomery & Dietrich, 1994; Guzzetti, 2005; Piedade, 2009; Pimenta, 2011; Sobral, 2018). Segundo Guzzetti (2005), a aplicação destes métodos requer um trabalho realizado por etapas, sendo necessário proceder: ao reconhecimento e mapeamento dos movimentos; à identificação e mapeamento dos factores físicos que, directa ou indirectamente, podem ser correlacionáveis com a ocorrência de instabilidade; a classificação da área em várias classes de susceptibilidade; e a validação do modelo preditivo.

Os métodos quantitativos baseiam-se em regras físicas, matemáticas e estatísticas de forma a produzir cartografia rigorosa (Aleotti, 1999). Dentro destes métodos surgem abordagens de origem estatística, que utilizam métodos estatísticos para correlacionar os factores condicionantes da instabilidade e as ocorrências registadas em inventários (Carrara, 1983 Guzzetti, 2005). Com estes dados, recorrem a técnicas de estatísticas bi ou multi-variadas, de modo a obter ponderações objectivas da influência dos diferentes factores na ocorrência de instabilidade, os quais podem ser incorporados em modelos de previsão (Zêzere, 2005; Marques, 2008; Vasconcelos, 2011).

Os modelos de base física explicam a ocorrência da instabilidade de vertentes através da aplicação de princípio físicos (Aleotti, 1999; Guzzetti, 2005) e são, fundamentalmente, apoiados na aplicação de métodos de análise do equilíbrio limite. Estes utilizam estimativas das variáveis de natureza física e mecânica, determinadas por ensaios específicos, os quais são frequentemente acompanhados por retroanálise de instabilidades tipo, ocorridas no passado (Marques, 2008).

Os princípios físicos, ou factores, que condicionam a estabilidade, relacionam-se directamente com as características geotécnicas dos materiais e físicas das vertentes. Isto permite que, o estado de estabilidade ou instabilidade seja calculado por meio da aplicação de modelos que relacionam parâmetros como declive da vertente, ângulo de atrito interno, coesão, peso específico do material, posição do nível freático, espessura de solo total e solo saturado, entre outros (Pimenta, 2011). Na construção do modelo, e combinando estes parâmetros, torna-se possível o cálculo do valor do Factor de Segurança (FS), o qual informa o utilizador sobre a relação entre as forças resistentes e as forças instabilizadoras, que contribuem para a estabilidade ou instabilidade da vertente (Guzzetti, 2005; Vasconcelos, 2011; Pimenta, 2011). Esta relação pode ser descrita pela Expressão 2.2:

$$Fs = \frac{\text{Forças Resistentes}}{\text{Forças Instabilizadoras}} \quad [2.2]$$

De uma forma geral, considera-se que, valores de FS maiores que 1.0 indicam estabilidade e valores menores que 1.0 instabilidade. Um FS de 1.0 indica condições em que, por definição, o movimento se inicia por as forças instabilizadoras terem valor igual às resistentes (Guzzetti, 2005). Posto isto, quanto maior o valor do FS, maior será a estabilidade da vertente.

Um das vantagens destes métodos é a possibilidade de espacialização das condições de estabilidade das vertentes, possibilitando a representação cartográfica, e o cálculo do FS para cada unidade de terreno. Isto permitirá a identificação espacial das zonas potencialmente instáveis a partir da aplicação de expressões matemáticas que relacionam diversas variáveis e, após modelação, a reclassificação desses valores em classes de susceptibilidade (Pimenta, 2011).

Quando aplicados a grandes áreas, Guzzetti (2005) descreve que as condições de estabilidade local são geralmente avaliadas por modelos de estabilidade estáticos, como o do “Modelo do Talude Infinito”, onde o equilíbrio ao longo da superfície potencial de ruptura é considerado. Por simplificação, assume-se a superfície de ruptura plana, a profundidade fixa e paralela à superfície topográfica.

A estes modelos podem ser acoplados modelos hidrogeológicos, simples, estáticos ou dinâmicos, e geotécnicos, cujo objectivo principal é a aproximação matemática à realidade, melhorando a capacidade de previsão da localização da instabilidade (Pimenta, 2011). Alguns exemplos destes modelos determinísticos, com a introdução de modelos geotécnicos e hidrológicos, são descritos na literatura, por exemplo, Montgomery & Dietrich (1994), Dietrich *et al.*, (1995), Van Asch *et al.* (1999); Iverson (2000), Abramson *et al.* (2002), Harp *et al.*, (2006), Amaral *et al.*, (2009) e Catani *et al.*, (2010).

2.3.1. Modelo Geológico: Modelo do Talude Infinito

Das muitas variações que existem do modelo do Talude Infinito, uma das mais completas é a de Sharma (2002), que prevê o fluxo de água paralelo à superfície do terreno, permitindo a utilização do modelo em materiais coesivos. Esta característica torna este modelo mais abrangente comparativamente a outros, como por exemplo o de Montgomery e Dietrich (1994) onde os efeitos de coesão são desprezados. Por este motivo, para a análise da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa em vertente na área de estudo, recorreu-se à aplicação do modelo do Talude Infinito desenvolvido por Sharma (2002), o qual segue o modelo do “Equilíbrio Limite”.

No método de “Equilíbrio Limite”, assume-se que o plano de ruptura, que se localiza a uma profundidade pequena e constante, é paralelo à superfície topográfica e o comprimento da vertente é infinito, sendo os efeitos laterais e terminais na área deslizada ignorados (Zêzere, 2005). Este método permite avaliar a estabilidade do conjunto de vertente e calcular o FS para diferentes condições.

O modelo do Talude Infinito considera, muito simplificada, que a superfície de deslizamento é planar, a profundidade fixa e que as linhas de fluxo são paralelas à superfície topográfica (Fig.2.1) (Pimenta, 2011). Sharma (2002) indica que, um talude que se estenda por uma distância suficiente e que apresente um perfil de subsolo consistente, pode ser analisado com recurso ao modelo do Talude Infinito.

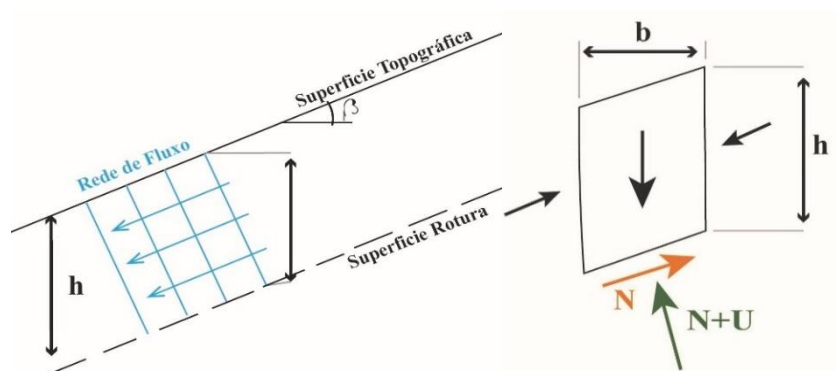


Figura 2.1: Representação de uma superfície do talude infinito para solos coesivos, com fluxo de água paralelo à superfície (Adaptado de Sharma (2002)).

No modelo de Sharma (2002), a integração de um modelo hidrogeológico em condições estáticas permite relacionar a razão entre a espessura de solo saturado e a espessura de solo potencialmente instável. O FS é calculado para cada unidade de terreno (pixel) com base no modelo de Talude Infinito, o qual incorpora um modelo de espessura de solo e um modelo hidrológico para a área de estudo (Melo, 2018), de acordo com a Expressão 2.3 de Sharma (2002):

$$F_s = \frac{c' + h \cos^2 \beta [(1 - m)\gamma + m \gamma_{sub}] \tan \phi'}{h \sin \beta \cos \beta [(1 - m)\gamma + m \gamma_{sat}]} \quad [2.3]$$

$$m = \frac{d_w}{h} \quad [2.4]$$

Nesta expressão, c' corresponde à coesão efectiva; h é a espessura de solo potencialmente instável; β é o declive da unidade de terreno; m corresponde à componente hidrológica do modelo, definindo-se como a razão entre a espessura de solo saturado (d_w) e a espessura de solo potencialmente instável (h) (Exp.2.4); γ , γ_{sub} e γ_{sat} correspondem ao peso específico natural, submerso e saturado do solo, respectivamente; por último, ϕ' corresponde ao ângulo de atrito interno efectivo do solo.

Este modelo pode ser integrado em ambiente SIG para a produção de cartografia de susceptibilidade. A sua aplicação, por meio da utilização da Expressão 2.3, permite a obtenção do valor de FS para cada unidade de terreno, o qual indicará as zonas potencialmente instáveis. Este valor será, posteriormente, reclassificado de modo a representar as áreas mais susceptíveis à ocorrência de movimentos de massa em vertente.

Este método apresenta resultados bastante fiáveis, sendo adequado para deslizamentos superficiais, uma vez que é expectável que a ruptura ocorra ao longo de superfícies de descontinuidade, onde o solo superficial, com pouca coesão, contacta com o substrato rochoso de maior resistência. (Melo, 2018).

2.3.2. Modelo Hidrológico: SHALSTAB

Para a obtenção da informação relativa à componente hidrológica do modelo do Talude Infinito de Sharma (2002), recorreu-se às ferramentas hidrológicas do modelo *SHALSTAB – Shallow Slope Stability Model*- de Montgomery & Dietrich (1994). Este modelo hidrológico em condições estáticas, é um modelo quantitativo que avalia a influência da topografia na ocorrência de movimentos de vertente superficiais. Parte do princípio que a espessura de solo instável não varia espacialmente, considera que as constantes de transmissividade e conductividade do solo saturado não variam em profundidade e que as propriedades físicas dos materiais geológicos são constantes em toda a área de estudo (Montgomery & Dietrich, 1994).

O seu desenvolvimento foi baseado no modelo hidrogeológico *TOPOG* de O'Loughlin (1986), que prevê o grau de saturação do solo como resposta a uma chuva estacionária, através da análise da área de contribuição da bacia, transmissividade do solo e do declive local (Montgomery & Dietrich, 1994). Este modelo *SHALSTAB* é baseado no modelo de Talude Infinito. Assume que a resistência ao movimento ao longo dos lados e no fim do movimento não é significativo e que a coesão é nula ao longo de toda a área de estudo (Vasconcelos, 2011).

O modelo *SHALSTAB* produz informação da susceptibilidade de ocorrência de movimentos superficiais através da compilação de dois modelos, um modelo hidrogeológico e o modelo de estabilidade do Equilíbrio Limite, que calculam a precipitação estacionária crítica necessária para promover a instabilidade de um declive num dado local. O modelo hidrogeológico mapeia os parâmetros espaciais do equilíbrio de saturação no solo e assume que, o fluxo se infiltra numa unidade com baixa conductividade e que o seu percurso é determinado pela topografia. A humidade local (W) é calculada pela razão entre o fluxo local derivado de uma precipitação estacionária (Q), após a saturação total do perfil do solo (Montgomery & Dietrich, 1994). Assumindo que, a condutividade do solo não varia em profundidade, pode considerar-se $W=h/z$, obtendo-se a Expressão 2.5.

$$W = \frac{h}{z} = \frac{Qa}{bT \sin \theta} \quad [2.5]$$

Onde, Q é a precipitação efectiva, a é a área de contribuição, b é o comprimento através do qual o fluxo é contabilizado, T é a transmissividade do solo, θ é o declive local. h ($=d_w$, do modelo geológico) é a espessura de solo saturado que se encontra acima de um layer impermeável e z ($=h$ do modelo geológico) é a espessura total de solo.

A expressão prevê a humidade do solo em função de uma precipitação estacionária, área específica da bacia hidrográfica (a/b), transmissividade do solo e declive local. Podemos verificar que, a variação da razão h/z , num determinado evento de precipitação, é determinada pela componente hidrogeológica e pela componente topográfica. A componente hidrogeológica é representada pela razão hidrológica, Q/T , que descreve a magnitude da precipitação, Q , em relação à capacidade de transmissão de água, T . Quanto maior o valor de Q relativamente a T , maior a probabilidade do solo se tornar saturado. A razão topográfica, ($a/(b \sin \theta)$), descreve o efeito topográfico no escoamento superficial (Dietrich & Montgomery, 1998; Montgomery *et al.*, 1998; Vasconcelos, 2011; Melo, 2018). Vasconcelos (2011) acrescenta ainda que, o efeito de convergência topográfica na concentração do escoamento superficial e a consequente elevação das tensões neutras deve-se à razão a/b , pelo que quanto maior a área de drenagem, a , relativamente à largura da célula, b , maior será o valor de h/z . Por sua vez, quanto maior o declive da vertente, mais rápido é o fluxo subterrâneo e menor será a humidade relativa expressa por h/z .

Na aplicação do modelo *SHALSTAB* no seu trabalho, Vasconcelos (2011), alterou a expressão de Montgomery & Dietrich (1994), introduzindo um termo que corresponde ao efeito de impermeabilização gerado pelas estruturas e infraestruturas nos terrenos subjacentes (fi). Esta alteração surge da necessidade de adaptar o modelo *SHALSTAB* a um meio urbano, de forma a obter resultados o mais fiáveis possíveis. O factor irá assim definir a quantidade de água que se irá infiltrar no solo tendo em conta o seu tipo de uso e ocupação. Aplicando este novo termo obtém-se a Expressão 2.6:

$$m = \frac{d_w}{h} = \frac{h}{z} = \frac{(q \cdot fi)}{T} \frac{a}{b} \frac{1}{\sin \theta} \quad [2.6]$$

É importante realçar que, o modelo faz a integração do referido módulo hidrológico, em condições estáticas, com o modelo do Talude Infinito, contudo umas das suas limitações é o facto de não permitir a introdução de mapas com a variação espacial dos valores de coesão e ângulo de atrito interno (Melo, 2018). Por este motivo, optou-se por utilizar apenas a componente hidrológica do modelo (m), obtida pela Expressão 2.6. E, na aplicação *SHALSTAB* no software *ArcView* 3.1, obteve-se apenas a variável correspondente à área de contribuição (a).

2.4. Precipitação

A precipitação é um dos factores que, na área de Lisboa, promove a ocorrência de movimentos de vertentes (Crozier, 1986; Gostelow, 1991; Zêzere *et al.*, 2005). Por isto, torna-se importante estudar o regime e os valores de precipitação acumulada que podem promover a ocorrência destes movimentos. Iverson (2000) descreve que, após a precipitação ocorre a infiltração da água no solo. Esta água promove uma subida temporária da pressão intersticial, assim como a perda de coesão efectiva devido à saturação do solo. Estes processos promoverão a redução da resistência crítica de corte dando origem, em consequência, à ocorrência de instabilidade.

A região de Lisboa possui um clima Mediterrânico com influência do sistema de baixa pressão originado no Oceano Atlântico e a precipitação anual varia entre os 600 e 1000 mm. A média de precipitação anual toma valores perto de 725mm, referente à análise de dados da estação de São Julião do Tojal, sendo o período de maior concentração compreendido entre os meses de Outubro e Março. O regime de precipitação é muito irregular, alternando entre períodos de seca, períodos de precipitação prologada e episódios de chuvas curtas e intensas (Trigo *et al.*, 2004; Zêzere *et al.*, 2005; Trigo *et al.*, 2005; Paredes *et al.*, 2006; Zêzere *et al.*, 2008).

Zêzere *et al.*, (2005) utilizou, no seu estudo, 19 ocorrências de movimentos de vertentes distribuídos por 11 anos, durante um período de observação de 50 anos, 1956 e 2005. Estas ocorrências foram caracterizadas tanto como movimentos translacionais superficiais como movimentos mais profundos (translacionais, rotacionais, complexos e compósitos). Tendo em conta as suas características e recorrendo a dados de precipitação diária, estes autores determinaram a relação entre a quantidade e a duração da precipitação, para os 19 eventos (Exp.2.7):

$$Cr = 7,4D + 107 \quad [2.7]$$

Na regressão linear, **Cr** é a precipitação acumulada (mm) e **D** a duração (dias). Adicionalmente, combinaram a intensidade da precipitação, **Ri** (mm/dia) com a duração e produziram outra regressão (Exp.2.8):

$$Ri = 84,3D^{-0,57} \quad [2.8]$$

Vasconcelos (2011) no desenvolvimento do seu trabalho sobre o Concelho de Lisboa procedeu à correlação de valores de precipitação em dois dias contíguos medidos em duas estações, São Julião de Alportel e a estação do IDL, no Jardim Botânico da UL. Esta correlação tinha como objectivo perceber se os limiares de precipitação podiam ser aplicados também no Concelho de Lisboa, visto a fonte de dados do estudo de Zêzere *et al.*, (2005) se encontrar a 15 km da sua zona de estudo e num contexto geomorfológico diferente. Concluiu-se que as diferenças nos regimes de precipitação não eram suficientemente significativas para que fossem consideradas abordagens distintas dos dados. Em consequência, neste trabalho foram também aplicados estes limiares críticos na determinação da quantidade de precipitação necessária para desencadear os movimentos de vertente.

3. Enquadramentos da Área de Estudo

3.1. Enquadramento Geográfico

A área de estudo compreende a freguesia de Santa Maria Maior, pertencente ao concelho de Lisboa (Fig.3.1). Lisboa é uma cidade posicionada na zona Oeste de Portugal Continental e é limitada pela margem direita do Rio Tejo e pelos concelhos de Loures, Odivelas, Amadora e Oeiras.

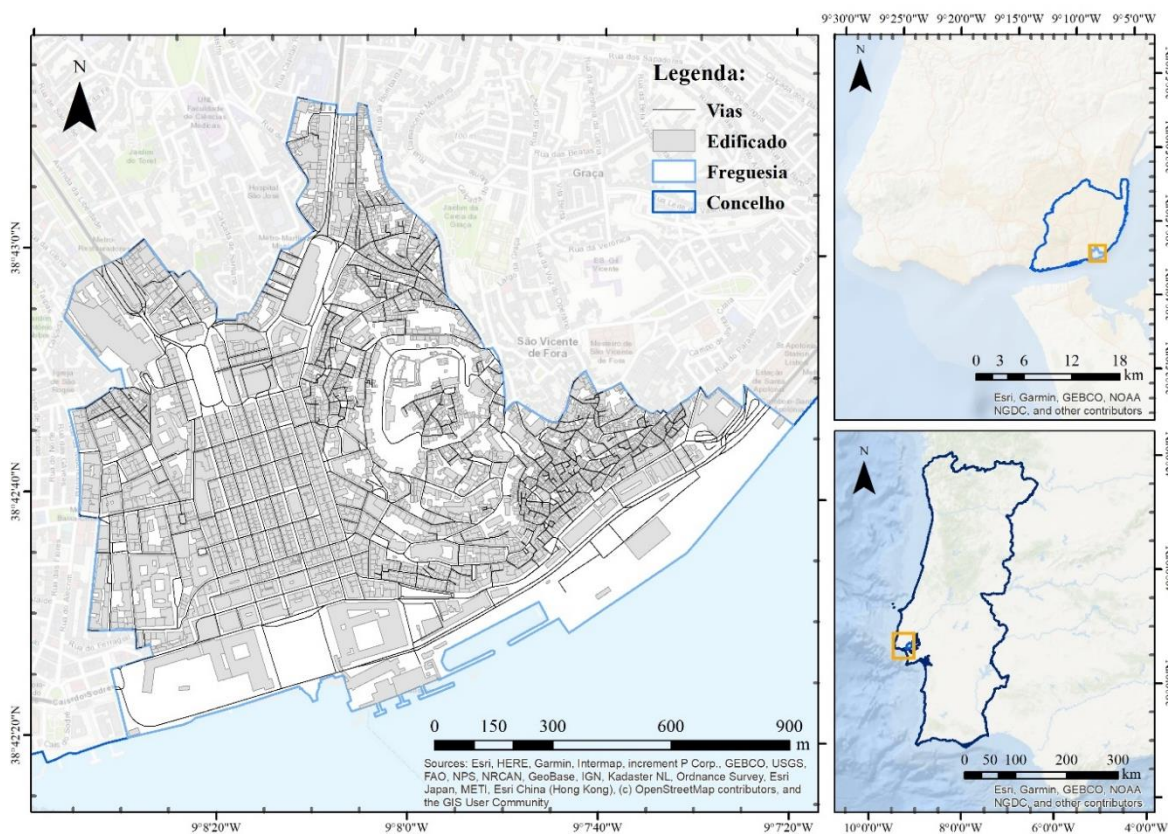


Figura 3.1: Enquadramento Geográfico da área de estudo. Localização da Freguesia de Santa Maria Maior no Concelho de Lisboa e em Portugal Continental (coordenadas ETRS89 Portugal TM06, Basemap World Ocean Base e World Topographic Map).

A freguesia de Santa Maria Maior posiciona-se na zona Sudeste do concelho, sendo uma das 24 freguesias em que Lisboa se divide. Esta freguesia confronta com as freguesias de São Vicente, a Leste, Arroios e Santo António, a Norte, e Misericórdia a Oeste. Tem área aproximada de 1,5 km² e engloba alguns dos bairros históricos de Lisboa como o bairro de Alfama, Baixa, Castelo, Chiado e Mouraria.

3.2. Enquadramento Geológico

A região de Lisboa encontra-se representada na Folha 34-C, Lisboa da Carta Geológica de Portugal, escala 1:50 000 (Pais *et al.*, 2006) e na Carta Geológica de Lisboa à escala 1:10 000 (Almeida, 1986). Na área de estudo é possível intersectar 7 formações geológicas da série Miocénico, de idade Aquitaniano e Burdigaliano, cobertas por depósitos recentes que incluem aluviões e aterros, da série Holocénico (Fig.3.2).

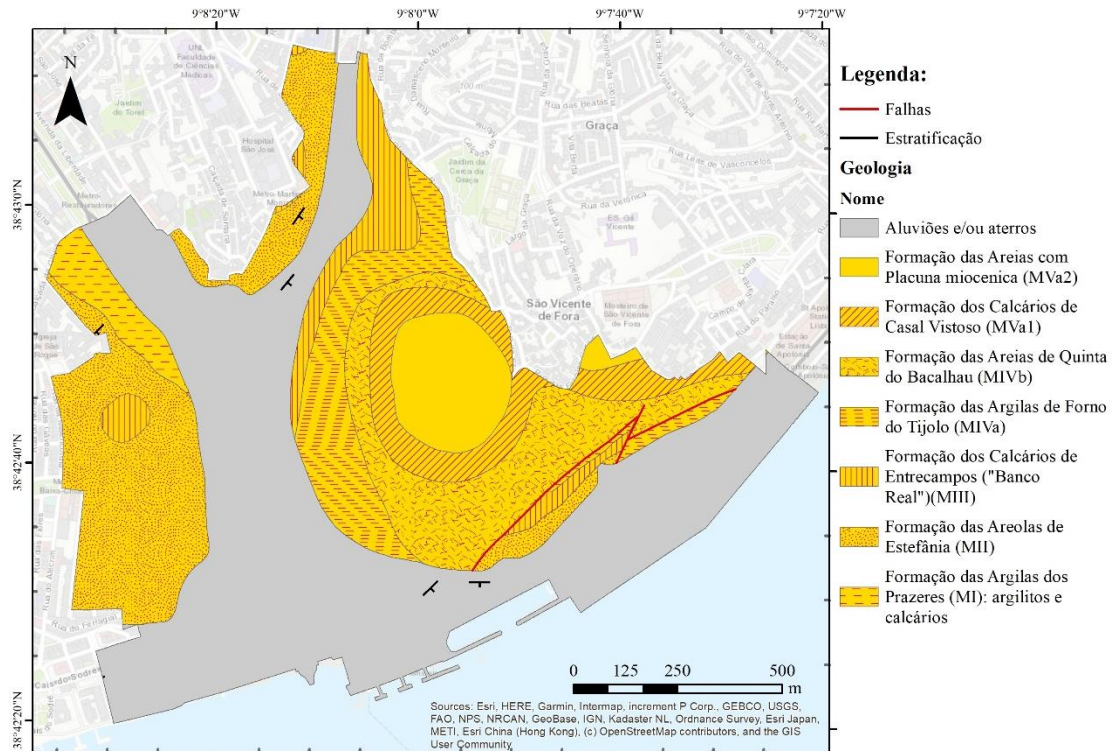


Figura 3.2: Enquadramento Geológico da Freguesia de Santa Maria Maior (Layer de Geologia da CML, escala 1:10 000, ETRS89 TM06, créditos LENG).

De acordo com Pais *et al.* (2006) e Almeida (1991) as formações são compostas, da mais recente para a mais antiga:

a -Aluviões e/ou aterros (a)

- **Aluviões:** Segundo Almeida (1991), em Lisboa estes depósitos encontram-se associados ao leito principal do rio Tejo e às ribeiras e linhas de água afluentes. As aluviões do Tejo apresentam espessuras muito variáveis e são predominantemente lodosas, com abundante matéria orgânica, ou arenosas. Existe frequentemente alternância de fácies, com geometria lenticular, e importantes variações de composição e consistência. A maioria das fácies apresenta conchas ou fragmentos de conchas. As aluviões das ribeiras afluentes do Tejo apresentam uma composição muito dependente das litologias erodidas e espessuras relativamente baixas.

- **Aterros:** Em Lisboa existem aterros urbanos e marginais. Os aterros urbanos são frequentes e têm espessuras muito variáveis. Os depósitos são heterogéneos, predominantemente argilosos, arenosos ou argilo-arenosos, podendo conter blocos de diferentes dimensões. Os aterros marginais dispõem-se ao longo das margens do Tejo e apresentam espessuras menores, comparativamente aos anteriores, e resultam, genericamente, de processos de ganho de terreno ao rio (Almeida, 1991).

O Miocénico de Lisboa corresponde a uma fase de sedimentação constante, que ocorreu ao longo de 16 Ma, na zona vestibular do Tejo devido à subsidência intensa, que foi compensada por uma sedimentação activa de elementos terrígenos transportados pelos rios (Almeida, 1991).

M_{Va2} - Areias com *Placuna miocénica* (M_{pm})

Esta formação é representada por estratos de areias fluviais amarelas, com seixos rolados e argilas arenosas contendo vegetais e ostras. Apresentam frequentes impregnações de pirolusite, de cor

preta, às quais se seguem areias associadas a leitos finos de argila. As areias contêm muitos vertebrados e *Placuna* miocénica (fóssil guia), que embora não seja a fauna mais abundante, deu nome à unidade (Pais *et al.*, 2006). Esta unidade apresenta espessura de cerca de 12m.

M_{Va1} – Calcário de Casal Vistoso (M_{CV})

Unidade composta predominantemente por calcarenitos, muito fossilíferos e intercalações arenosas. Os calcários e calcarenitos são mais abundantes no topo e base do complexo. Na zona intermédia predominam areias mais ou menos argilosas com intercalações de argilas, por vezes lenticulares, e com vegetais (Almeida, 1991). Apresentam espessuras compreendidas entre 3 e 12 m.

M_{Ivb} - Areias de Quinta do Bacalhau (M_{QB})

Formação representada por bancadas de areias, em parte ferruginosas, de cores amarelas, esbranquiçadas e avermelhadas, sendo esta última a cor mais intensa e predominante. As areias de cor esbranquiçada são mais homogéneas e têm moldes de gastrópodes, passando a calcários mais ou menos compactos com conteúdo fossilífero. É frequente a presença de bancadas de areias com concreções ferruginosas (Cotter, 1956; Almeida, 1991). Apresentam-se intercalações de espessos níveis de areias e lenticulas de argilas mais ou menos silto-arenosas e micáceas. Nos níveis arenosos existem jazidas de fósseis de vertebrados e de vegetais. A espessura desta formação é de cerca de 35m (Almeida, 1991). Esta formação foi explorada em inúmeras pedreiras no concelho de Lisboa, embora nesta área de estudo não haja registo desta actividade.

M_{Iva} – Argilas de Forno Tijolo (M_{FT})

Esta unidade é formada por camadas de argilas, margas e grés fino argiloso micáceo de cores escuras. Por vezes, apresenta intercalações de estratos delgadas e compactos de rocha molássica muito fossilífera, de tons claros (Cotter, 1956; Almeida, 1991). Apresenta espessuras muito diferentes, podendo variar entre os 15 e os 45m. Do conteúdo fossilífero destaca-se as faunas de molúsculos, peixes e abundantes microfósseis (Pais *et al.*, 2006). Estas argilas foram intensamente exploradas para o fabrico de tijolo, contudo, uma vez mais, na área em estudo não se regista ocorrência desta actividade.

M_{III} – Calcários de Entrecampos (“Banco Real”) (M_{EC})

Nesta unidade destaca-se a acumulação de fragmentos de conchas e moldes, de matriz carbonatada, calcarenitos finos margosos e arenitos micáceos pouco carbonatados. São visíveis variações horizontais e laterais de fácies, e para o topo, os calcários são compactos e mais arenosos, passando progressivamente à formação das “Argilas de Forno Tijolo”. A espessura varia entre os 12 e 17 m (Almeida, 1991). Esta formação é também conhecida por “Banco Real” e as suas bancadas foram exploradas como rocha ornamental, sendo possível observá-la nas fachadas de alguns monumentos da cidade e em construções da zona histórica.

M_{II} – Areolas de Estefânia (M_{Es})

Esta formação caracteriza-se pela presença de areias finas, siltosas e micáceas (areolas) de cores vivas, argilas silto-arenosas e arenitos mais ou menos consolidados. As areias apresentam um carácter lenticular intercaladas com as argilas. A espessura varia entre 24 e 36 m (Almeida, 1991).

M_I – Argilas dos Prazeres (M_{Pr})

Esta unidade constitui a base do miocénico de Lisboa e apresenta-se sobreconsolidada. Nela podemos observar estratos compostos por argilitos, argilitos siltosos, argilitos margosos, margas e

calcários. Nos níveis argilosos existem vegetais incarbonizados, cristais de marcassite e gesso. A formação apresenta cerca de 30 m de espessura, pontualmente com importantes variações locais.

Dentro das próprias formações existe uma grande variação vertical e lateral de fácies, factor condiciona localmente as suas características e comportamento.

Na Tabela 3.1 apresentam-se as áreas aflorantes onde se regista cada formação, tendo como base o mapa da Figura 3.2. É possível destacar que a maioria da superfície é ocupada pelas aluviões e/ou aterros (45%), seguindo-se a Formação das Areolas de Estefânia (16,9%) e, por fim, a Formação das Areias de Quinta do Bacalhau (10,5%). As restantes formações encontram-se representadas numa área menor.

Tabela 3.1: Área superficial ocupada por cada formação geológica na área de estudo.

Formações Geológicas	Área (km²)	Área (%)
Aluviões e/ou aterros (a)	0,672	45,02
Formação das Areias com <i>Placuna</i> miocenica (M _{Va2} - M _{pm})	0,083	5,55
Formação dos Calcários de Casal Vistoso (M _{Va1} - M _{cv})	0,092	6,16
Formação das Areias de Quinta do Bacalhau (M _{IvB} - M _{QB})	0,156	10,45
Formação das Argilas de Forno do Tijolo (M _{IvA} - M _{FT})	0,120	8,06
Formação dos Calcários de Entrecampos ("Banco Real") (M _{III} - M _{Ee})	0,081	5,43
Formação das Areolas de Estefânia (M _{II} - M _{Es})	0,252	16,88
Formação das Argilas dos Prazeres (M _I - M _{Pr})	0,037	2,46
Total	1,492	100%

Relativamente à estrutura geológica, segundo Almeida *et al.* (1997), a colina dos Castelo é modelada nas formações miocénicas, correspondendo a um monoclinal inclinado para SSE. O seu topo é morfologicamente condicionado por um nível de calcários e arenito, sendo que, sob este nível, existem formações arenosas com intercalações de bancadas de arenitos, alternadas com níveis silto-argilosos e calcários. Na colina de São Roque o comportamento é semelhante, com a estrutura a inclinar para SE, e no topo da colina encontram-se formações carbonatadas.

Na zona do Bairro de Alfama, existe um controlo tectónico exercido por um conjunto de falhas, de direcção aproximada NE-SW (Almeida, 1972), que terá originado uma estrutura complexa, com levantamento das formações a Sul (Almeida *et al.*, 1997). Nesta zona, a estrutura permitirá a ocorrência de nascentes hidrominerais, o Grupo das Alcaçarias (Andrade, 1935; Choffat, 1985- 1988; Ramalho & Lourenço, 2006) e do Chafariz D'El Rei.

No vale do Tejo e no esteiro da Baixa, as formações miocénicas foram escavadas, pelos rios e ribeiras ao longo dos anos, e cobertas por material aluvionar. Também é comum encontrar-se depósitos de aterro e de vertente no sopé dos taludes/ vertentes, derivados de acumulação de materiais provenientes de movimentos anteriores ou restos de construções (material de entulho).

Nos perfis geológicos apresentados na Figura 3.3 é possível verificar as estruturas geológicas descritas anteriormente. A localização dos perfis encontra-se no Anexo 1.

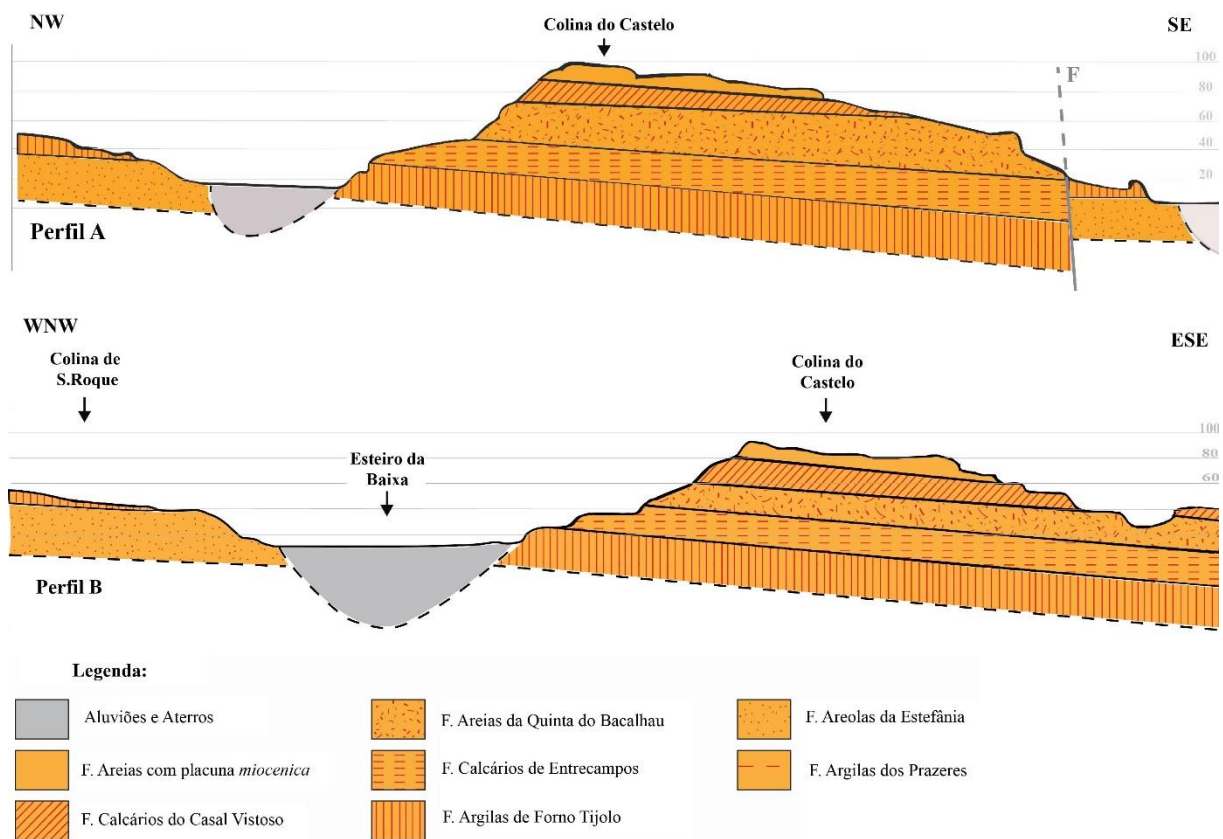


Figura 3.3: Perfis geológicos da área de estudo. Perfil A, orientação NW-SE, estende-se desde a margem do rio Tejo, passando pela Colina do Castelo e terminando no Martim Moniz. Perfil B, orientação WNW-ESE, estende-se da Colina do Castelo, passando pelo Esteiro da Baixa e terminando na Colina de São Roque. Localização no Anexo 1.

3.3. Enquadramento Geomorfológico

Lisboa é conhecida como a “Cidade das sete colinas”, designação esta que decorre dos vários relevos em colina que são identificáveis na cidade quando vista do rio, e que incluem as colinas de São Vicente, Santo André, Castelo, Santana, São Roque, Chagas e Santa Catarina. A cidade desenvolve-se entre as cotas dos 3 - 4m, junto ao rio, até 227,8m, registadas no Monsanto. Pontualmente existem outros locais com cotas elevadas como, por exemplo, Penha de França a 127.9m e o Castelo de São Jorge a 98,4m.

Na área de estudo, após produção do modelo digital de terreno (MDT) (resolução de 5m) (Fig.3.4), registaram-se valores de altitude entre os 3 e os 99m, junto ao rio e no ponto mais alto da Colina do Castelo, respectivamente. É possível destacar que as cotas mais baixas (≤ 15 m) compreendem metade da área da freguesia (49%), estando a restante área distribuída por valores de altitude entre os 15 e os 99m.

A freguesia compreende duas colinas, a Colina do Castelo e a Colina de São Roque (destacadas a tom de amarelo), e zonas aplanadas resultantes da acumulação de material proveniente das ribeiras e do rio Tejo (destacadas a verde) (Fig.3.4).

Segundo Almeida (1991), na área de estudo afloram as litologias miocénicas, cujos relevos são fortemente condicionados pela litologia e estrutura geológica, sendo evidente os fenómenos de erosão diferencial e os relevos do tipo costeiro que dele resultam.

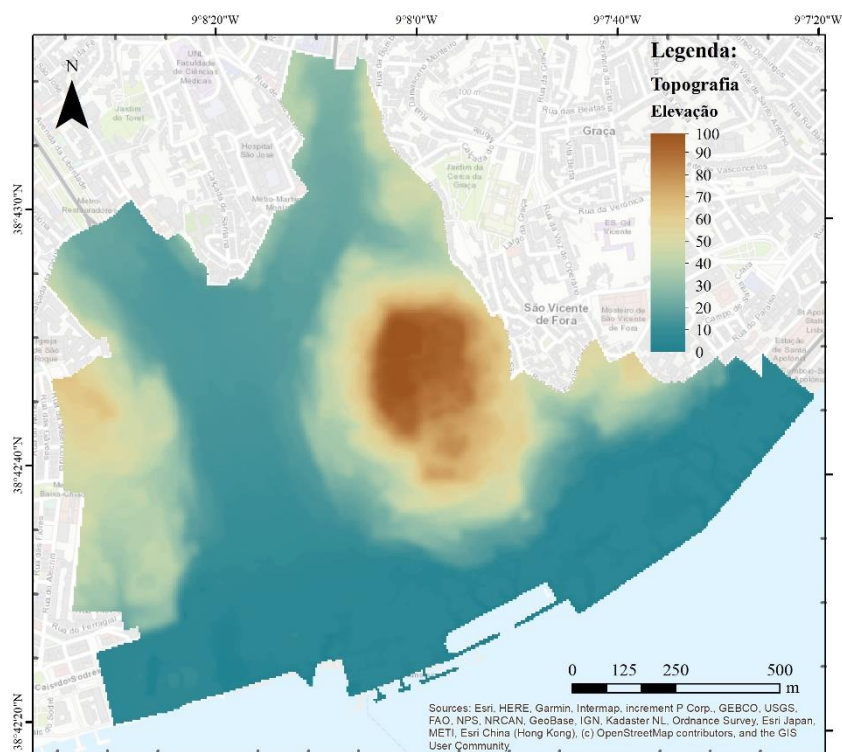


Figura 3.4: Mapa topográfico da área de estudo.

A rede de drenagem instalou-se nas formações menos resistentes, evoluindo para vales assimétricos, enquanto, as formações mais resistentes, originaram planaltos e alinhamentos de cornijas. Um bom exemplo é o relevo da Colina do Castelo, composto por rochas com maior componente carbonatada, mais resistentes, rodeado pelo vale da ribeira instalada nas formações mais brandas, com maior componente detrítica. Estes relevos em cornijas promovem a ocorrência de desabamentos e queda de blocos (Vasconcelos, 2011).

Relativamente à distribuição dos declives (Fig.3.5), é possível constatar que os valores mais baixos se encontram associados, na maioria das vezes, às zonas onde afloram aluviões e/ou aterros, como é visível nas margens do rio Tejo e no esteiro da Baixa. Por sua vez, os valores mais elevados estão associados às zonas onde se dispõem as formações miocénicas e às vertentes das linhas de água. Estes declives são mais notórios ao longo das vertentes da colina do Castelo, havendo várias zonas onde os declives apresentam inclinação maior que 40°. Em contraste, existem várias zonas aplanadas delimitadas por estes declives mais acentuados, como por exemplo o topo da colina do Castelo. A colina de São Roque, designadamente as suas vertentes Este e Sul, apresentam também declives elevados, ainda que menos abundantes, e várias zonas onde os declives tendem a ser menos significativos.

Na Tabela 3.2 encontra-se sintetizada a distribuição dos declives pela área total da freguesia. Os dados permitem destacar que, a maioria da área da freguesia, apresenta declives baixos, compreendidos entre 0 e os 15° de inclinação (aproximadamente 79%), com predomínio dos declives menores que 5° (52%). Os declives mais altos têm uma representação menor a nível de área total, mas são estes declives que tendem a promover condições de instabilidade de vertentes.

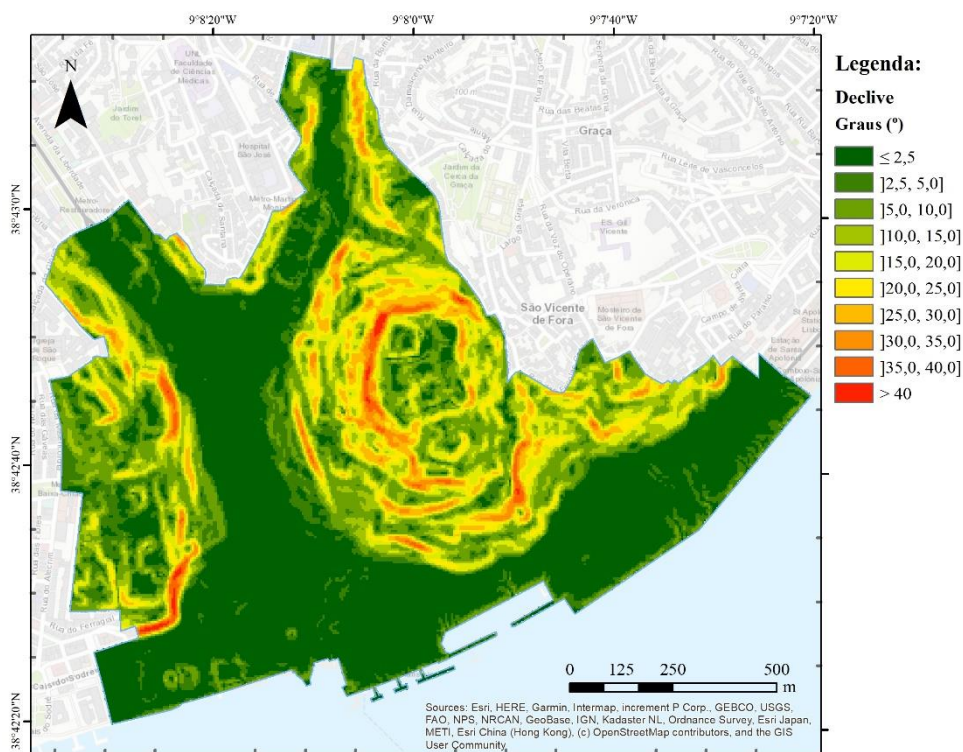


Figura 3.5: Mapa de declives da área de estudo.

Tabela 3.2: Distribuição das Classes de Declive pela área de estudo.

Classes Declive	Área (km ²)	Área (%)
$\leq 5,0$	0,779	52,21
]5,0, 10,0]	0,236	15,79
]10,0, 15,0]	0,160	10,75
]15,0, 20,0]	0,129	8,62
]20,0, 25,0]	0,090	6,00
]25,0, 30,0]	0,058	3,92
]30,0, 35,0]	0,026	1,74
]35,0, 40,0]	0,012	0,79
> 40,0	0,003	0,18
Total	1,492	100 %

3.4. Enquadramento Hidrogeológico

A hidrogeologia local e a consequente presença ou ausência de água no solo são dos factores que mais condicionam a ocorrência de movimentos de vertente. Torna-se importante conhecer as características hidrogeológicas das várias formações, perceber quais destas condicionam a presença e quantidade de água no subsolo, assim como entender a sua distribuição no espaço e em profundidade.

Portugal Continental encontra-se dividido em 4 Unidades Hidrogeológicas (Fig.3.6) (SNIRH, 1997-2021): Maciço Antigo (Maciço Ibérico ou Hespérico); Orla Mesocenozóica Ocidental; Orla Mesocenozóica Meridional; Bacia Terciária do Tejo-Sado. Cada uma destas unidades morfo-estruturais foi definida com base nas características dos aquíferos e das unidades geológicas (Almeida *et al.*, 2000).

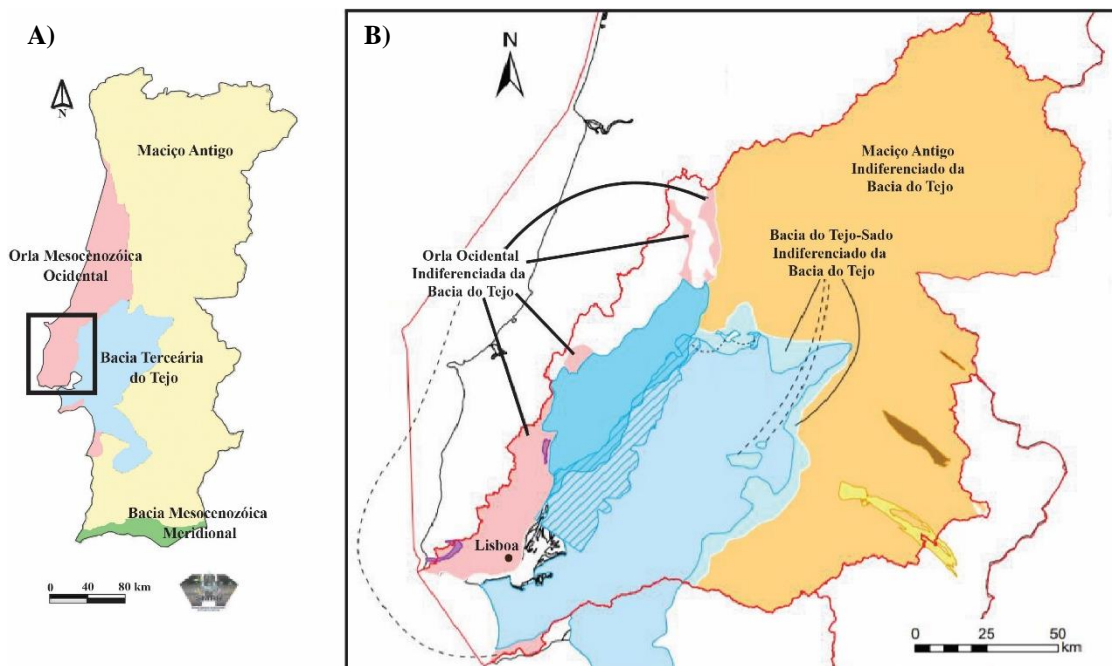


Figura 3.6:A) Localização das Unidades Hidrogeológicas de Portugal Continental e da zona de estudo. A amarelo encontra-se representado o Maciço Antigo, a rosa a Orla Mesocenozóica Ocidental, a azul a Bacia Terceária do Tejo e a verde a Bacia Mesocenozóica Meridional; B) Localização da Orla Ocidental Indiferenciada da Bacia do Tejo, a rosa, e localização de Lisboa (Adaptado de SNIRH e de Monteiro & Salvador (2012)).

O concelho de Lisboa e a freguesia em estudo estão posicionados na unidade da Orla Mesocenozóica Ocidental (ou Orla Ocidental) (SNIRH, 1997-2021). Esta unidade hidrogeológica localiza-se sobre as formações de uma bacia sedimentar, a Bacia Lusitânica, na qual existem sistemas aquíferos importantes, relacionados com as formações calcárias e detrítica. Segundo Almeida *et al.* (2000), a organização sequencial das formações com diferentes comportamentos hidrogeológicos gera uma alternância de aquíferos, aquíferos e aquíferos, característica que permite a existência de um sistema multicamada com escoamento e drenagem intercadas, de acordo com o potencial local.

Nesta unidade hidrogeológica a circulação subterrânea desenvolve-se, assim, em dois tipos de sistemas: sistemas cársicos e sistemas porosos. Nos sistemas cársicos, característicos de rochas calcárias e dolomitos, a circulação é condicionada pela existência de fracturas e cavidades. Nos sistemas porosos, típicos de formações detríticas miocénicas e terciárias, devido às variações laterais e principalmente verticais na faceis geológica, a circulação de água processa-se em zonas de contrastes de permeabilidade originando sistemas multicamada. A heterogeneidade das formações é responsável pela existência de diferentes permeabilidades e, como consequência, diferentes capacidades de armazenamento. O regime hidrogeológico encontra-se, por isso, dependente das condições estruturais, topográficas e das litologias locais, mas também da ocupação e uso do solo urbano.

Para efeitos de sistematização funcional, Pinto (2003), promoveu o estabelecimento de complexos hidrogeológicos. Na área de estudo foram considerados o Complexo Aluvionar e o Complexo Multicamada Miocénico. Por sua vez, o complexo Multicamada Miocénico subdivide-se em sistemas, dos quais quatro estão representados na área de estudo: Sistema Calcarenítico Miocénico; Sistema das Argilas de Forno Tijolo; Sistema do Miocénico Inferior; Sistema das Argilas de Prazeres (Fig.3.7).

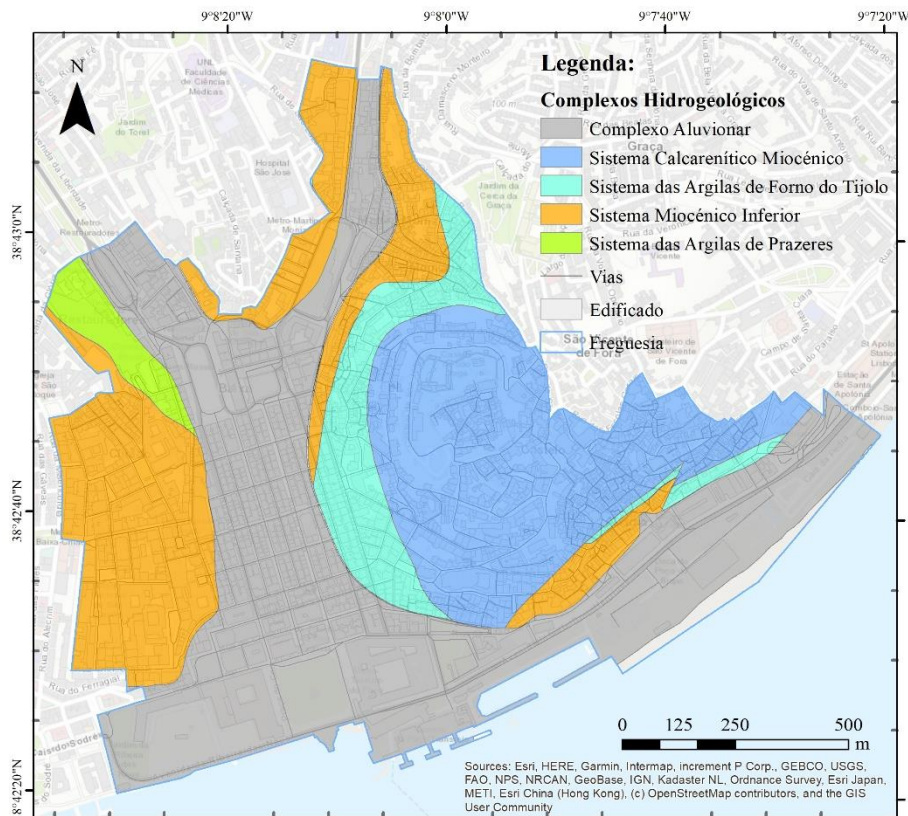


Figura 3.7: Sistemas hidrogeológicos na área de estudo (dados CML, escala 1:10 000, ETRS 89 TM06).

Complexo Aluvionar:

O Complexo Aluvionar engloba as aluviões do Tejo e as aluviões das linhas de água subsidiárias. A predominância de determinada fracção granulométrica influencia a porosidade e consequentemente a sua permeabilidade.

Este complexo, de um modo genérico, caracteriza-se pela presença de unidades lenticulares de condutividade hidráulica contrastantes. Os solos arenosos apresentam condutividade hidráulica relativamente elevada, com comportamento de aquífero. Em contraste, solos compostos por lodos e argilas apresentam condutividade hidráulica baixa, com comportamento de aquífero ou aquífero. Quando estas são mais ou menos contínuas e espessas, promovem o semi-confinamento e a delimitação das camadas de areias (Almeida *et al*, 2003).

As Aluviões do Tejo são predominantemente argilo-lodosas e lodo-argilosas, com abundante matéria orgânica, ocorrendo intercalações de níveis arenosos de diversa granularidade, seixos e restos de vegetais incarbonizados. Estas características geram permeabilidades diferentes, permitindo o desenvolvimento de níveis confinados. O complexo apresenta uma baixa porosidade e, por consequência, uma baixa permeabilidade, encontrando-se saturado e tendo uma baixa capacidade de armazenamento. O nível de base registado corresponderá ao nível de base do estuário do Tejo, refletindo as variações do nível de maré. Em contraste, as aluviões das linhas de água subsidiárias são compostos por materiais heterogéneos, não consolidados e com matéria orgânica frequente. Almeida (1991) descreve que, como estes materiais refletem a composição da litologia erodida, a sua permeabilidade varia em função do substrato geológico em que estes se encontram, variando assim de baixa a alta (Pinto, 2003).

Complexo Multicamada Miocénico:

O Complexo Multicamada Miocénico é caracterizado por uma alternância de camadas relativamente permeáveis, constituídas por areias, arenitos e calcários, e por outras semipermeáveis/impermeáveis, compostas por argilitos e siltitos (Almeida *et al.*, 2003). O comportamento hidrogeológico deste sistema depende da sua heterogeneidade litológica, podendo este ser subdividido em seis sistemas, dos quais quatro estão representados na área de estudo (Almeida *et al.*, 2000).

O Sistema “**Calcarenítico do Miocénico**” é composto pelas formações das Areias com *Placuna* miocénica, Calcários do Casal Vistoso e Areias da Quinta do Bacalhau, e é caracterizado pela alternância de calcários, mais ou menos compactos, e areias grosseiras com intercalações argilosas. O sistema apresenta uma permeabilidade média a alta, comportando-se como aquífero.

O Sistema “**Argilas de Forno Tijolo**” é composto pela formação que lhe dá nome, apresentando uma forte componente argilosa. A permeabilidade do sistema é baixa e revela comportamento de aquífero (Almeida *et al.*, 2000; Pinto, 2020).

O Sistema “**Miocénico Inferior**”, constituído pelas formações dos Calcários de Entrecampos e das Areolas da Estefânia, é um sistema detrítico onde ocorre um aumento da componente carbonatada da base para o topo. Estas características conferem ao sistema uma permeabilidade alta e um comportamento de aquífero. Este aquífero encontra-se confinado a topo pelo sistema “Argilas de Forno Tijolo” e na base pelo sistema “Argilas dos Prazeres” (Pinto, 2020).

O Sistema “**Argilas dos Prazeres**” é formado pela formação que lhe dá nome e apresenta uma forte componente argilosa resultante da intercalação de bancadas de argilas, mais ou menos arenosas, com bancadas de natureza margosa e carbonatada. Tendo em conta a predominância da fácies argilosa e o seu elevado grau de consolidação, considera-se que o sistema tem baixa permeabilidade. Apenas nos estratos calco-margosos, ligeiramente fissurados, ocorre entrada de água e há um aumento da permeabilidade do tipo fissural. O contraste de permeabilidades promove o movimento dos caudais subterrâneos em função da conexão entre as fracturas e do seu preenchimento, o que permite a existência de aquíferos suspensos (Pinto, 2020)

3.5. Enquadramento Hidrológico

Para além dos factores geológicos e hidrogeológicos descritos anteriormente, existem outras características que, aliadas ao desenvolvimento urbano, irão influenciar de forma importante os processos naturais de infiltração e circulação da água no solo.

A Hidrologia Urbana é um ramo que estuda as zonas urbanas, onde as superfícies quase impermeáveis e o relevo artificial do terreno são predominantes. Esta disciplina analisa o impacto que o desenvolvimento urbano irá ter no ciclo natural da água e desenvolve formas de o minimizar (Martins *et al.*, 2010). Vários autores têm abordado esta problemática numa tentativa de entender, descrever e quantificar a influência da urbanização de grandes áreas na alteração do ciclo natural da água. Monition (1977), Lerner (1990), Van de Ven (1990), Schmidt & Michael (2004), Stone & Bullen (2006), Martins *et al.*, 2010, Yang & Zhang (2011), entre outros, descrevem nos seus trabalhos diversas abordagens sobre os sistemas urbanos, os seus comportamentos e como estes influenciam os recursos hídricos de cada cidade (Lima *et al.*, 2010).

De um modo geral, as bacias urbanas são descritas como entidades complexas de elevada variabilidade espacial, constituídas por sistemas de linhas de água naturais (vias) e drenos artificiais (valetas, valas, canais, tubos de drenagem, colectores pluviais, etc.) que estão interligados entre si (Martins *et al.*, 2010). Estes sistemas apresentam fontes que podem ser consideradas naturais, no caso da água proveniente da precipitação, ou artificiais, no caso da água dos sistemas de abastecimentos, regas, furo, etc (Van de Ven, 1990; Lerner, 1990). Esta água irá circular sobre um solo urbanizado, com aterros, construções, infraestruturas, coberturas superficiais, sem vegetação, entre outras características, que exibirá um comportamento muito distinto do expectável para um solo natural.

Na ocorrência de um evento de precipitação, sobre um solo natural e numa área sem alterações topográficas, é expectável que haja infiltração da água no solo, da zona não saturada para o lençol freático, e que o escoamento superficial seja tanto menor quanto maior a capacidade de infiltração da água no solo. A água infiltrada irá servir de recarga e alimentação dos aquíferos subterrâneos e, a água de escorrência, irá circular pela superfície até ser colectada pelas linhas de água naturais e alimentar os aquíferos.

No caso de existir um solo com acentuado desenvolvimento urbano, estes processos naturais sofrem modificações significativas. Estas modificações surgem em consequência das alterações não naturais induzidas nas variáveis hidrológicas como a precipitação, a evapotranspiração, a infiltração e o escoamento superficial, que tendem a variar ao longo do tempo e que contribuem para o balanço hídrico de uma dada área (Martins *et al.*, 2010). Para além destas variáveis, as alterações no relevo, das características geológicas e da vegetação também são factores condicionantes para o balanço hídrico (Lerner, 1990; Martins *et al.*, 2010):

- O **relevo** tem uma influência directa na velocidade e na distribuição do escoamento superficial, na resposta da bacia à precipitação e no tempo de concentração da água, na erosão hídrica do solo e no transporte de sedimentos;
- As **características geológicas** e o tipo de solo influenciam o regime dos caudais líquidos, o escoamento sub-superficial e superficial e o caudal sólido transportado.
- A **vegetação**, nestas bacias urbanas, tende a afectar o balanço hídrico, interceptando a precipitação, permitindo a evapotranspiração, favorecimento da infiltração da água no solo e diminuição do volume de escoamento total.

A conjugação de todas as alterações nos solos naturais derivados da construção e expansão urbana apresenta, assim, um conjunto significativo de consequências nos sistemas de água naturais que nem sempre são dimensionadas ou equacionadas na altura do desenvolvimento dos sistemas de águas urbanas, o que se reflete no desenvolvimento de inúmeras situações de perigo.

Tendo em conta as características naturais que tendem a sofrer alteração com a urbanização, surge uma ideia que é comum a todos os autores que desenvolvem esta problemática: A urbanização promove distúrbios na circulação natural de água, superficial e subterrânea, por meio de fortes modificações topográficas, alterações das características dos solos naturais e pelo desenvolvimento acentuado de construções. Estas alterações refletem-se sobretudo nas alterações dos padrões de infiltração, escoamento, circulação e armazenamento derivados da impermeabilização, compactação e da perda de capacidade de armazenamento do solo.

Impermeabilização do Solo:

A alteração dos solos naturais ou o seu revestimento por materiais pouco permeáveis, promove a impermeabilização da superfície (Van de Ven, 1990; Lerner, 1990; Stone & Bullen, 2006). Como consequência directa da impermeabilização haverá, na maioria dos casos, uma menor infiltração, a

diminuição da recarga natural dos aquíferos (Lerner, 1990) e a inibição de circulação subterrânea. Por sua vez, a menor infiltração promove uma maior quantidade de escoamento superficial o qual (1) irá escoar a favor da pendente e sofrer acumulação ou, (2) será colectado pelos sistemas de água pluviais e esgotos e posteriormente descarregado nas linhas de águas naturais.

A circulação subterrânea será inibida por diversos factores, de entre os quais, pelo défice de entrada de água no sistema, mas também, devido às obstruções que os edifícios e estruturas enterradas criam à circulação de água nos solos.

Os edifícios, estruturas e revestimentos superficiais tendem a afectar a recarga directa, não havendo a alimentação natural dos aquíferos, o que promove a existência de um défice de entrada de água no sistema subterrâneo. Para além disto, esta cobertura tende a inibir os processos de evapotranspiração, devido à remoção da vegetação natural, mas também devido à impermeabilização que não favorece este processo. Pode acontecer, nos casos em que a alimentação não é feita por infiltração, que a inibição da evapotranspiração (Van de Ven, 1990) ou a existência de fugas nos sistemas de abastecimento gere quantidades elevadas de água no solo ou acumulações, quando esta não apresenta caminho de circulação.

As estruturas subterrâneas, afectam essencialmente a circulação da água subterrânea, formando caminhos artificiais à circulação ou gerando uma obstrução à mesma (Lerner, 1990). Nestes casos, as principais consequências surgem quando os fluxos são transportados para zonas não equacionadas, sem preparação para a presença da mesma. Localmente poderá ocorrer o aumento dos níveis freáticos derivado do confinamento desta água, que quando é excessivo poderá originar inundações nas estruturas e construções envolventes, ou alterações no comportamento físico dos materiais que compõem o solo, podendo derivar em movimentos de massa.

Quando se reconhece que a impermeabilização do solo apresenta uma relação directa com o aumento do escoamento superficial, surgem vários cenários não naturais que podem ter consequências a vários níveis. No primeiro caso, onde a água percorre o caminho desimpedido a favor da pendente, esta pode sofrer acumulação em diversos locais (Van de Ven, 1990). Dependendo se este local apresenta ou não cobertura, e se essa cobertura apresenta características permeáveis ou impermeáveis, surgem consequências diferentes. No caso em que a acumulação se dá numa zona permeável, parte desta água irá sofrer infiltração e irá servir de recarga aos aquíferos subterrâneos (Mather, 1978; Van de Ven, 1990; Lerner, 1990). Por sua vez, se a cobertura for impermeável, gera-se um novo impedimento à sua infiltração e a acumulação pode ser assim suficiente para gerar a saturação do solo, inundações e consequências importantes nos edifícios e estruturas urbanas.

No segundo caso, em que o escoamento superficial será colectado pelos sistemas pluviais e esgotos, é comum que se formem inundações e transbordo das linhas de água a jusante do sistema. A recolha de grandes caudais pelos sistemas tende a promover um aumento repentino do volume de água transportado, gerando uma maior taxa de fluxo e o prolongamento do período de pico (Stone & Bullen, 2006). Isto reflete-se em inundações e transbordos no leito nas zonas envolventes às linhas de água sempre que o volume é suficientemente significativo.

Compactação do Solo:

A compactação do solo é outra das consequências abordadas por Stone & Bullen (2006) e Yang & Zhang (2011) que apresenta uma grande importância perante solos estratificados, saturados e lateralmente confinados. As várias forças artificiais associadas a cargas estáticas e impactos dinâmicos a que o solo é sujeito tendem a alterar os padrões de compactação do solo (Jim, 1993; Yang & Zhang, 2011). Na aplicação de cargas sobre o solo, este tende a sofrer uma diminuição do volume, aumento da

sua densidade e, conseqüentemente, sofrer uma diminuição da porosidade e da condutividade hidráulica saturada (Glinski & Lipiec, 1990; Yang & Zhang, 2011). A sua compactação excessiva reduz a quantidade de água no solo e, este factor aliado à impermeabilização e ao aumento do escoamento superficial, promove a ocorrência de inundações durante eventos de precipitação. Mesmo em solos permeáveis, a compactação do solo mais superficial leva à diminuição da sua porosidade e a uma menor capacidade de infiltração da água promovendo sempre uma diminuição na recarga dos aquíferos.

Capacidade de Armazenamento:

O desenvolvimento dos grandes centros urbanos promove uma perda de capacidade de armazenamento através da alteração dos limites de retenção do escoamento, superficial e subterrâneo (Schmidt & Michael, 2004), para além da alteração das características dos solos. Como conseqüências directas da urbanização surge a diminuição das recargas naturais, criando um défice de entrada de água nos sistemas. Este factor, aliado à diminuição da porosidade e condutividade hidráulica, promove a diminuição de água que o sistema é capaz de armazenar. Por sua vez, as alterações topográficas tendem a alterar o substrato geológico (por remoção, adição ou alteração de solos), podendo este perder as suas características de armazenamento, por perda de confinamento lateral ou por alteração textural dos solos. Em contraste, as alterações poderão também favorecer a recarga gerando uma nova zona de alimentação ou favorecer a acumulação quando se cria uma camada de confinamento.

Tendo em conta os processos apresentados ao longo deste subcapítulo, é importante salientar que as fontes de água naturais não são as únicas que podem contribuir de forma significativa para a entrada de água nos sistemas. A água proveniente de perdas na rede de distribuição constitui uma fonte de entrada bastante significativa (Monition, 1977; Lerner, 1990; Van de Ven, 1990; Vasconcelos, 2011), uma vez que é complicado reduzir as perdas para valores inferiores a 10% (Lerner, 1990). Lerner (1990) descreve ainda que, já foram identificadas perdas na ordem dos 50% da distribuição total, pelo que, em casos mais específicos estes valores podem tornar-se realmente importantes, principalmente nos locais onde a impermeabilização não desempenha um contributo importante (Vasconcelos, 2011).

A Freguesia de Santa Maria Maior encontra-se sujeita a uma elevada densidade urbana apresentando a sua superfície fortemente ocupada por edifícios, infra-estruturas, vias, etc... e o subsolo por estruturas, parques e garagens. Esta urbanização acentuada, aliada à diminuição dos solos naturais e da vegetação, ao relevo das colinas, substrato geológico local e à abundante presença de aterros tende a originar os processos descritos anteriormente. Deste modo, tornou-se importante a pesquisa hidrogeológica e hidrológica, pois é fundamental perceber a distribuição da água na freguesia uma vez que esta é um dos factores que condiciona fortemente o desenvolvimento de movimentos de massa em vertentes.

4. Campanha de Campo

A freguesia de Santa Maria Maior apresenta uma forte urbanização, pelo que o trabalho de campo não foi directamente orientado para a geologia aflorante, que é escassa, mas sim para os potenciais indícios de instabilidade existente nas estruturas. O foco principal do trabalho de campo incidiu assim, nas fachadas do edificado e muros de suporte, nos indícios que estes pudessem apresentar.

Para que o trabalho de campo fosse orientado para zonas específicas, delimitou-se os locais da freguesia que já teriam sido identificados pela CML como susceptíveis (Fig.4.1). A CML terá identificado, até à data, 19 locais onde se dispõem zonas de susceptibilidade classificada como moderada, elevada e muito elevada. Estas estão associadas, na sua maioria, ao relevo da Colina do Castelo e, em menor quantidade, à Colina de São Roque. Para estes 19 locais foram elaborados vários mapas, com escala de pormenor, referentes a 35 áreas que tinham como foco a zona de susceptibilidade delimitada e o edificado nela contemplado. Estes mapas serviram de orientação para as campanhas de campo e para a organização dos dados recolhidos.

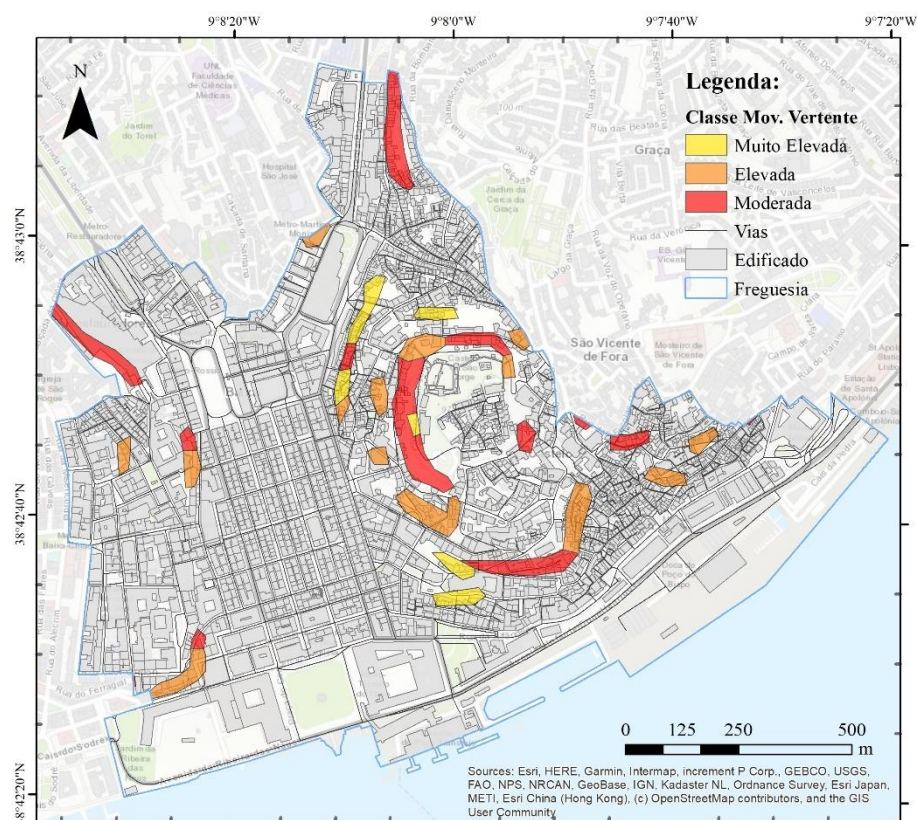


Figura 4.1: Distribuição das zonas identificadas como susceptíveis à ocorrência de movimentos de massa em vertentes pela CML, utilizadas para a orientação das campanhas de campo.

4.1. Dados Recolhidos

No âmbito da campanha de campo foram recolhidos dados sobre a existência de danos no edificado e muros, presentes em cada zona identificada como susceptível.

Relativamente ao edificado, os dados recolhidos prendem-se numa caracterização que incida sobre o seu estado de conservação e as suas características estruturais. Para os muros de suporte, algumas das características recolhidas são idênticas às do edificado, como a avaliação do estado de conservação

e a caracterização estrutural. Contudo, procurou-se também recolher dados considerados importantes como a existência de estruturas de drenagem, de equipamentos de monitorização, o número de pregagens e a dimensão de malhas de contenção, quando presentes. Nas tabelas apresentadas a seguir encontram-se discriminados os dados recolhidos sobre o edificado e muros de suporte, Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente. A cada categoria de dados recolhidos encontra-se associada uma breve descrição geral e os critérios adoptados para a sua classificação. Esta última coluna pretende esclarecer o método de decisão utilizado durante a recolha dos dados de campo.

É importante salientar que nem sempre o edificado apresentava patologias compreendidas apenas numa das classes consideradas. Deste modo, no caso em que o edificado apresentava mais do que uma patologia estrutural, procedeu-se à identificação da patologia dominante, sendo que estas foram as patologias consideradas na primeira abordagem numérica. No entanto, outras patologias foram registadas nas observações de modo a permitir o uso futuro da informação.

4.2. Resultados

Ao longo do trabalho de campo foi recolhida informação à cerca de 1397 edifícios, posicionados em 160 ruas da freguesia de Santa Maria Maior e 35 muros de suporte distribuídos ao longo das zonas observadas (Fig.4.2). Cada edifício foi descrito conforme os critérios apresentados na Tabela 4.1 e para os muros de suporte utilizou-se os critérios da Tabela 4.2. Após recolha procedeu-se à análise quantitativa dos dados obtidos, a qual será apresentada em seguida.

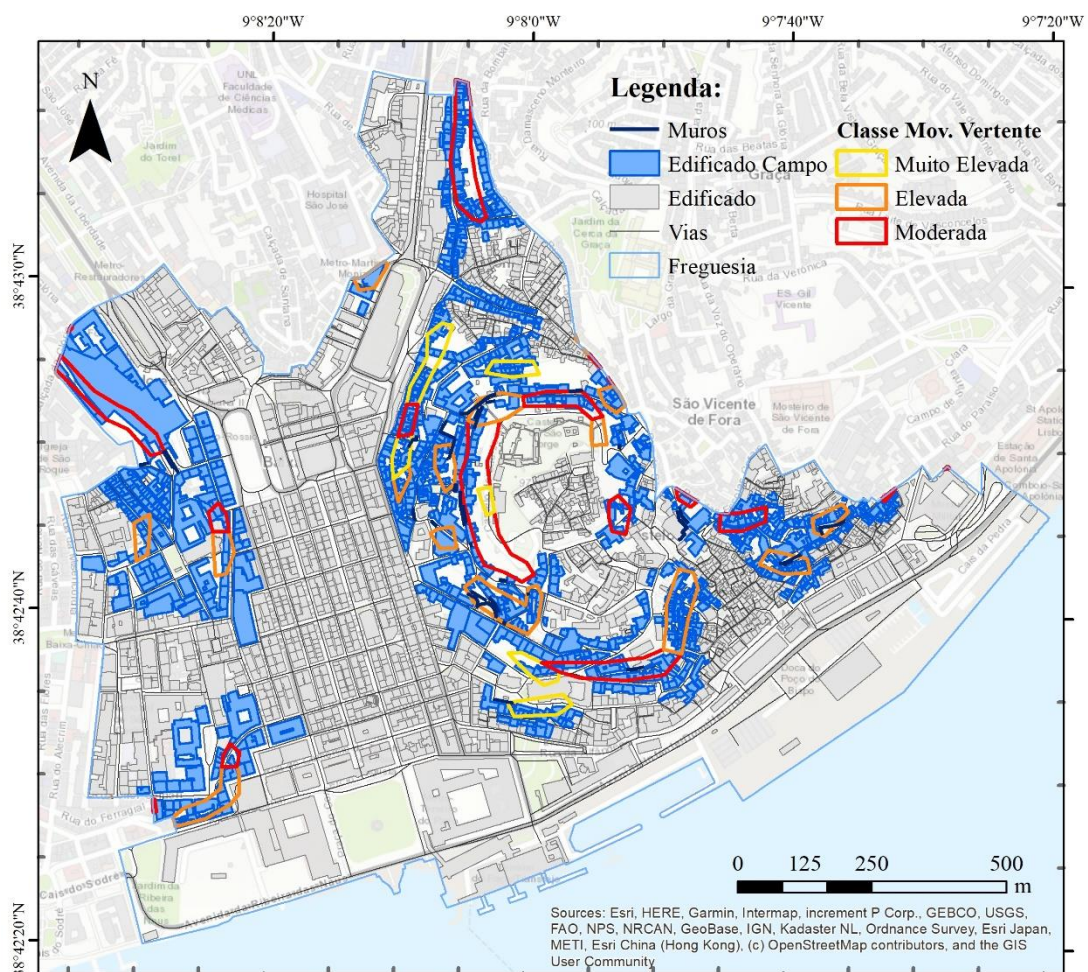


Figura 4.2: Distribuição do edificado e dos muros de suporte analisados e descritos durante a campanha de campo (representados a azul), com pormenor para a localização das zonas consideradas susceptíveis pela CML

Tabela 4.1: Sintetização, discriminação e descrição dos dados recolhidos sobre o edificado durante a campanha de campo.

Dados Recolhidos - <u>Edificado</u>		Descrição	Categorias
Código SIG			
Morada			
Estado de Conservação da Fachada	Fachada Principal	Corresponde ao estado de conservação da fachada	<p>Boa - Fachada em bom estado de conservação, com bom aspecto e ausência ou baixa densidade de patologias.</p> <p>Média- estado de conservação intermédio, por uma manutenção deficiente ou por apresentar patologias evidentes que comprometem o bom estado e o aspecto da fachada.</p> <p>Deficiente- fachada em mau estado de conservação, por má manutenção ou pela existência de uma densidade considerável de patologias.</p>
	Fachada Tardoz	1* como descrito na fachada principal	1* como descrito na fachada principal
Caracterização Estrutural	Caracterização Estrutural do Edificado	Identificação do material de construção utilizado na estrutura do edifício	<p>Mista- estrutura em material de alvenaria e betão</p> <p>Betão- estrutura composta por betão</p>
	Intervenções ou Alterações Estruturais	Considera a evidências de intervenções/ alterações recentes no edificado	<p>Sim- existem evidências de alterações</p> <p>Não- não existem evidências de alterações</p>
	Principais Patologias	Considera a análise das patologias identificáveis	<p>Classe I: Fissuras, correspondem a aberturas com afastamento muito reduzido, com um desenvolvimento discreto que afecta apenas a parte superficial do reboco;</p> <p>Classe II: Empolamento, pode corresponder ao desenvolvimento de um desnivelamento com subida do solo/piso e aparecimento de bolhas ou bolsas de água no seio da pintura; Fendas, aberturas com afastamento significativo, que afectam toda a espessura do reboco; Reboco em desagregação, desagregação parcial ou total do reboco, ficando este exposto; Pavimentos desnivelados, corresponde as diferenças de nível identificáveis entre os pavimentos, escadarias, etc...;</p>
			<p>Classe III: Assentamento, corresponde a depressões que se criem à superfície; Fendas com desaprumo da fachada, fendas que apresentem evidências de deslocamento notório com inclinação da fachada; Desagregação do material de alvenaria, destaque de materiais de construção que colocam, por consequência, as paredes de alvenaria à vista;</p> <p>Classe IV: Edificado sem quaisquer patologias visíveis.</p>
Referência Fotográfica			
Observações			

Tabela 4.2: Sintetização, discriminação e descrição dos dados recolhidos sobre os muros de suporte durante a campanha de campo.

Dados Recolhidos – <u>Muros de suporte</u>		Descrição	Categorias
Código SIG			
Morada			
Estado de Conservação Geral do Muro		1* como descrito para o edificado	Bom; Médio; Deficiente
Existência de Estruturas de Drenagem		Presença/ ausência de estruturas de drenagem	Sim; Não
Existência de Equipamentos de Monitorização		Presença/ ausência de equipamentos de monitorização.	Sim; Não
Caracterização Estrutural	Caracterização Estrutural do Muro	Identificação da estrutura do muro, podendo ser classificado em 10 classes	Muro de gravidade: de pedra, betão simples, betão armado, gabiões; Muro consola/ parede moldada; muro consola/ parede pré-fabricada; parede betonada <i>in situ</i> , parede ancorada; aterros reforçados; mistos
	Intervenções ou Alterações Estruturais	Considera a evidência de intervenções/ alterações recentes no edificado	Sim; Não
	Principais Patologias	Considera a análise das patologias identificáveis (1* como descrito para o edificado)	Classe I: fissuras; Classe II: empolamento, fendas, reboco em desagregação, pavimentos desnivelados; Classe III: assentamento, fendas com desaprumo da fachada, desagregação do material de alvenaria; Classe IV: sem patologias.
Dados Técnicos	Comprimento	Medição da extensão do muro	
	Altura	Medição da altura do muro	
	Nº de Níveis de Ancoragens/ Pregagens	Contabilização do número de ancoragens e pregagens quando existentes	
	Distância H/V entre os elementos da malha de contenção	Medição da distância horizontal/ vertical entre os elementos da malha de contenção presente nos muros	
Elementos de risco		Correspondem aos elementos exposto em caso de ocorrência de um fenómeno natural danoso	Pessoas; Bens; Pessoas e bens; Nenhum.
Referências Fotográficas			
Observações			

4.2.1. Edificado

Seguindo os critérios discriminados na Tabela 4.1, foram descritos os vários edifícios englobados nas áreas susceptíveis e envolventes. O estado de conservação das fachadas principais é descrito por observação directa, o que permite a recolha significativa de informação. Da análise final dos dados é possível constatar que, a maioria dos edifícios, apresentada fachadas em bom estado de conservação (79%), seguindo-se fachadas em estado médio (16%, Anexo 2) e, por último, com estado deficiente (2%, Anexo 3) (Figura 4.3, Anexo 4). Os restantes edifícios, cerca de 3%, encontravam-se em obras (2%), impossibilitando a recolha de dados, ou não foi possível recolher a informação (1%) devido à fachada se encontrar coberta ou ser inacessível. As fachadas tardoz raramente foram observadas devido à inacessibilidade da maioria, pelo que não existem dados referentes a estas.

Observando as características estruturais do edificado, é evidente a dominância das estruturas mistas (97%) comparativamente aos edifícios com estrutura em betão. A maioria não apresenta evidências de intervenções ou alterações recentes (55%) e menos de metade apresenta uma fachada onde é possível identificar a ocorrência de obras ou de algum tipo de alteração (42%) (Figura 4.4, Anexo 5).

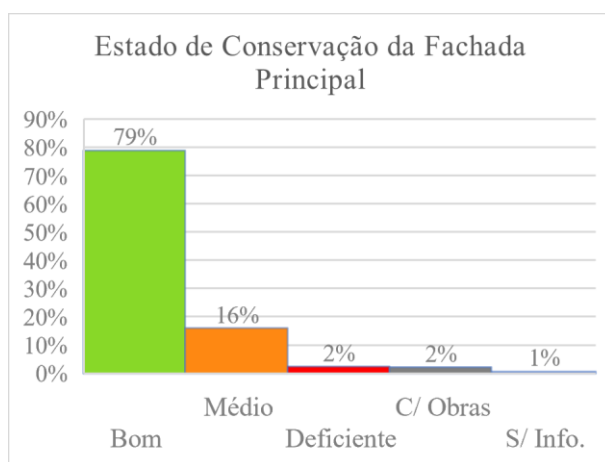


Figura 4.3: Gráfico com a distribuição dos valores referentes ao estado de conservação da fachada principal do edificado, segundo os dados sintetizados na Tabela 4.1

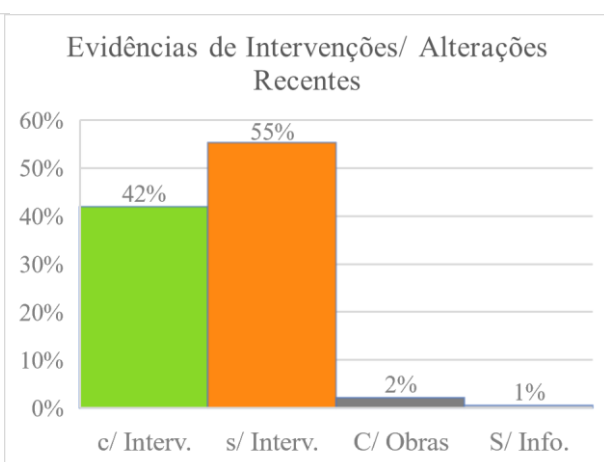


Figura 4.4: Gráfico com a distribuição dos valores referente à existência ou ausência de intervenções/alterações recentes reconhecíveis nas fachadas principais, segundo os dados sintetizados na Tabela 4.1.

Relativamente às patologias estruturais (Figura 4.5 e 4.6), a classe mais abundante é a Classe IV, onde 45% dos edifícios não apresenta patologias na sua fachada. Dos restantes, a Classe I é a segunda mais abundante (36%), seguindo-se a Classe II (14%) e com menor representação a Classe III (3%). Contabilizando o número de patologias identificáveis em cada um dos edifícios (Figura 4.7), constata-se que existem edifícios que apresentam, em simultâneo, até quatro tipos de patologias diferentes. O padrão mais comum é a inexistência de patologias (45%) ou a presença de apenas uma (38%). Neste caso, a ocorrência mais comum é existência de fissuras (Classe I) ou de reboco em desagregação (Classe II). Quando coexistem duas patologias (12% dos casos), predomina a ocorrência simultânea de fissuras e reboco em desagregação. Os edifícios com três (2%) e quatro patologias (<1%) são menos abundantes e contêm, com maior frequência, a ocorrência simultânea de fissuras (Classe I), reboco em desagregação, fendas, empolamentos (Classe II) e desagregação do material de alvenaria (Classe III). É importante ter em conta que estas foram as patologias com maior incidência no edificado, não invalidando a existência de associações diferentes das apresentadas. Nos Anexos 6, 7, 8 e 9 encontram-se representadas algumas imagens referentes a edifícios com patologias estruturais como fissuras, reboco em desagregação, fendas e desagregação do material de alvenaria, respectivamente.

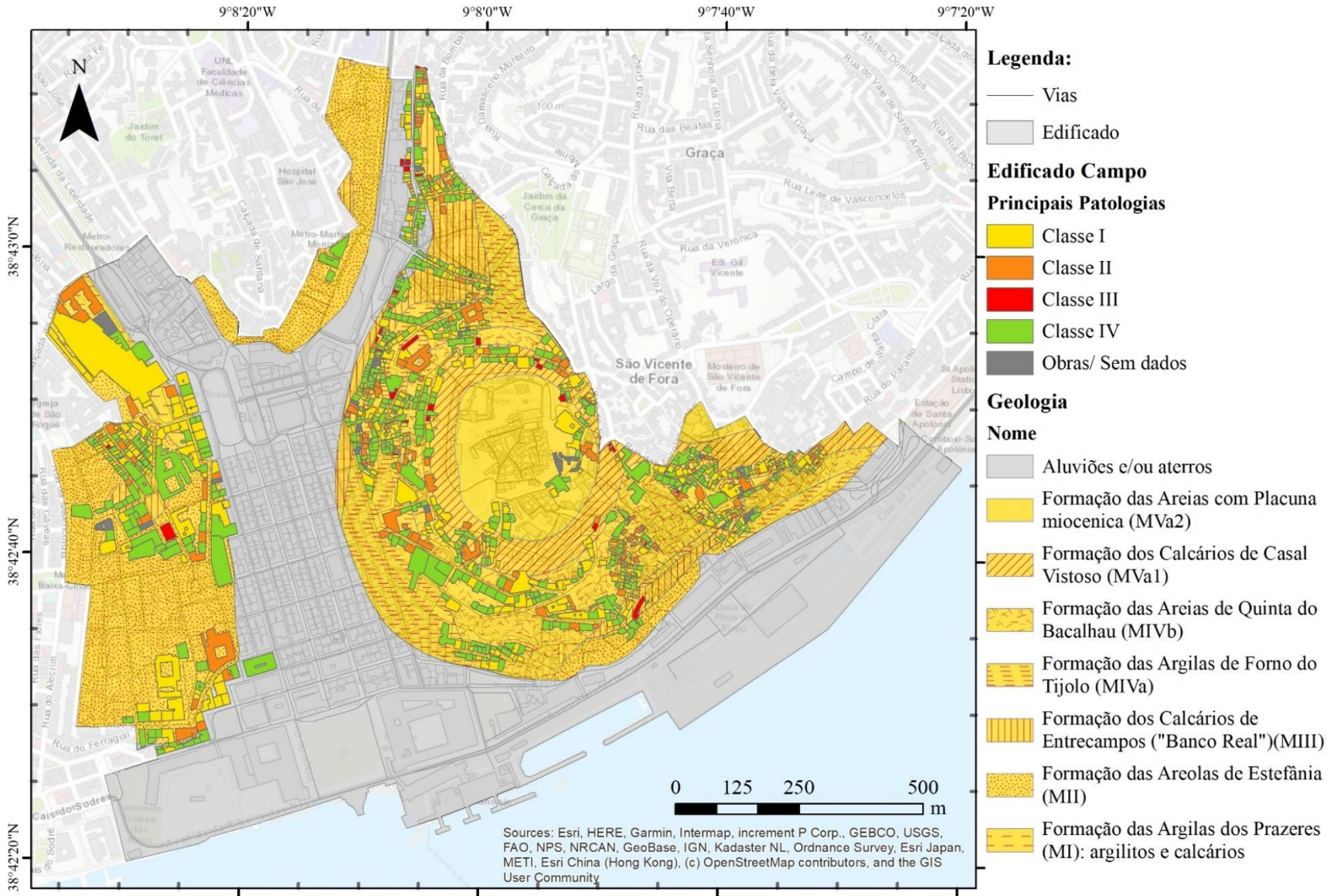


Figura 4.5: Distribuição das classes de patologias identificadas em cada edifício durante o trabalho de campo e a sua localização sobre a geologia da área de estudo.

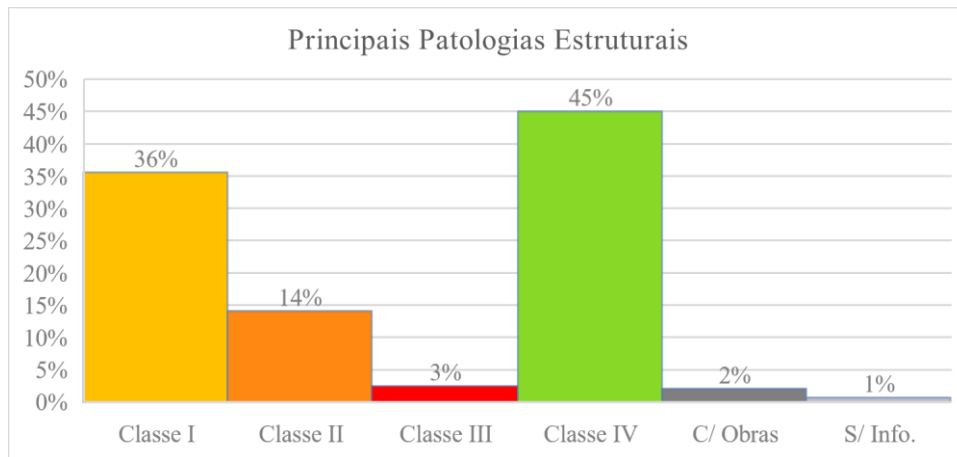


Figura 4.6: Gráfico com a distribuição das principais classes de patologias estruturais identificadas nos edifícios observados durante a campanha de campo, com base nos parâmetros sintetizados na Tabela 4.1.

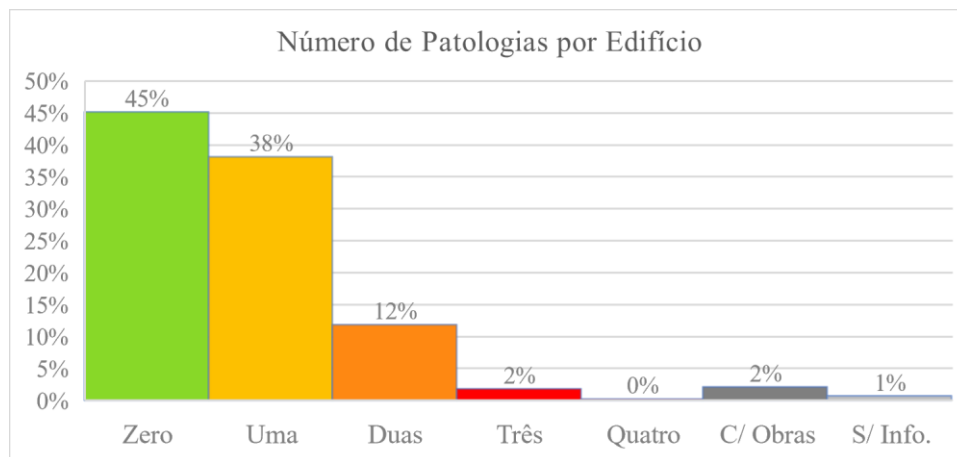


Figura 4.7: Gráfico com a contabilização do número de patologias estruturais incidentes num mesmo edifício.

4.2.2. Edificado vs. Geologia

A Geologia do substrato sobre o qual assenta o edificado é um dos principais factores que condiciona o desenvolvimento de patologias estruturais, para além das próprias características de construção. Deste modo, procedeu-se a uma análise das características do edificado tendo em conta as formações geológicas sobre a qual estão posicionados, de modo a tentar perceber se existirá um padrão que permita identificar a ocorrência de instabilidade.

Numa primeira abordagem correlacionou-se em ambiente SIG a Geologia e o Edificado coberto pelo trabalho de campo e analisou-se as suas características. Desta análise resultou um ficheiro de saída com 1189 edifícios, dos quais 992 encontram-se posicionados sobre uma formação geológica, 194 encontram-se no limite de duas formações e 3 no limite entre 3 formações. Para estes edifícios teve em conta a formação que continha maior área do edifício, sendo este associado a essa formação geológica.

É de notar que o número de edifícios aqui utilizado é diferente do número inicial contabilizado em campo (1397), uma vez que o método em campo se baseou na recolha de dados tendo em conta os números de porta e ruas. Quando estes dados são mapeados ficam referenciados apenas ao código do edifício, mesmo que este apresente fachada em mais que uma rua e vários números de porta, o que reduz significativamente o número contabilizado.

Os valores que se seguem encontram-se normalizados relativamente à área total ocupada por cada formação na freguesia. A normalização dos dados surge da necessidade de retirar a influência das formações com maior representação, permitindo a obtenção de valores passíveis de comparação.

Correlacionado o estado de conservação da fachada principal com a formação geológica (Figura 4.8, Anexo 4) sobre a qual assentam os edifícios, é possível constatar que a maioria dos edifícios em **bom estado** dispõem-se sobre as formações de M_{III} (M_{Ec} , 24%), M_{Ivb} (M_{QB} , 23%) e em M_{val} e M_{Iva} (M_{CV} e M_{FT} , 17%). Os restantes edifícios distribuem-se em menor número pelas outras formações, variando de 8 a 1%. Dos edifícios com fachadas em **médio estado**, destacam-se os que se dispõem sobre as formações M_{III} (M_{Ec} , 32%) e M_{Ivb} (M_{QB} , 27%) com a maior representação da classe. Nas restantes formações os valores variam entre 18 e 0%. Nos edifícios com fachada em **deficiente estado**, as formações M_{III} (M_{Ec} , 33%), M_{Iva} (M_{FT} , 22%), M_{val} (M_{CV} , 19%) e M_{Ivb} (M_{QB} , 17%) são os que tomam valores mais elevados. Nas restantes formações, a distribuição varia entre 5 e 0%. Observando a distribuição deste estado de fachada comparativamente aos restantes, verifica-se que, na generalidade dos casos (em 5 de 8), esta destaca-se por uma maior representação.

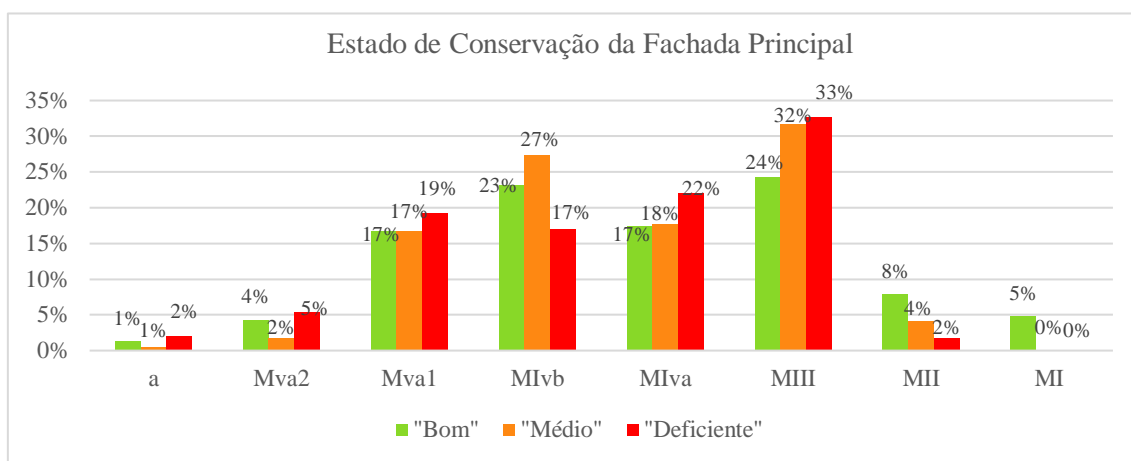


Figura 4.8: Gráfico com estado de conservação da fachada principal distribuído consoante a formação geológica sobre a qual se localiza o edifício. A verde destaca-se os dados das fachadas em bom estado, a laranjas de fachadas em estado médio e a vermelho as fachadas em deficiente estado de conservação. O nome das formações geológicas encontra-se descrito abaixo de cada conjunto de dados.

Relativamente às características estruturais (Figura 4.9, Anexo 5), os edifícios posicionados sobre as formações de M_{Ivb} e M_{III} (M_{QB} e M_{Ec} , ambos com 28%) são os que apresentam mais indícios de intervenções ou alterações recentes. As restantes formações, apresentam números menores, compreendidos entre 15% e os 1% (Gráfico 4.6). Os edifícios sem intervenções ou alterações encontram-se distribuídos uniformemente pelas formações de M_{III} (M_{Ec} , 24%), M_{Ivb} (M_{QB} , 21%), M_{val} (M_{CV} , 20%) e M_{Iva} (M_{FT} , 19%) e em menor número pelas restantes. De modo geral, pode afirmar-se que há uma distribuição mais ou menos equilibrada entre os edifícios com e sem intervenções pelas várias formações geológicas.

Para as patologias dominantes (Figura 4.5 e gráfico da Figura 4.10) a classe I predomina nas formações M_{Ivb} (M_{QB} , 26%), seguindo-se na M_{III} (M_{Ec} , 21%) e M_{Iva} (M_{FT} , 17%). As outras formações apresentam menor representação, assumindo valores entre 12 e 2%. Na classe II, destacam-se valores muito significativos nas formações de M_{III} (M_{Ec} , 33%), M_{Ivb} (M_{QB} , 28%) e M_{Iva} (M_{FT} , 20%) e valores muito pouco representativos nas restantes, com quatro formações com representação menor que 4%. Na Classe III, existe um domínio da M_{III} (M_{Ec} , 29%), seguindo-se as formações M_{val} , M_{Ivb} e M_{Iva} (M_{CV} , M_{QB} e M_{FT}) com valores idênticos (19%). Em contraste, as restantes formações apresentam valores entre 7 e 0%, com M_I (M_{Pr}) sem representação. Por fim, na Classe IV, edifícios sem patologias, os valores variam

entre 31% na formação M_{III} (M_{Ec}), 25% nas M_{IVb} (M_{QB}) e 20% M_{IVa} (M_{FT}). Os valores menores variam entre 10 e 1%, sendo as aluviões e nas M_I (a e M_{Pr}) as classes com menor representação.

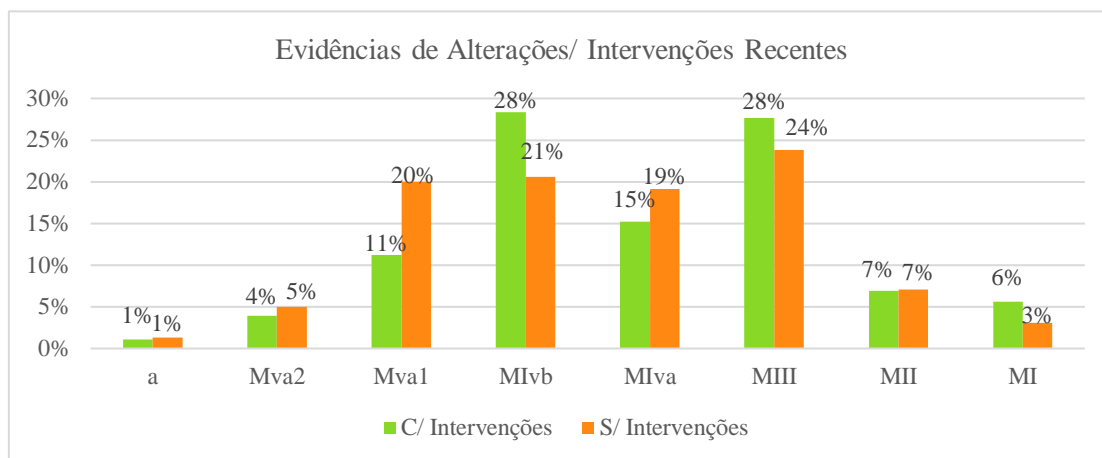


Figura 4.9: Gráfico com a distribuição do edificado quanto à existência de intervenções/ alterações recentes tendo em conta o substrato geológico sobre o qual estão posicionados. Representado a cor verde encontram-se os edifícios com intervenções/ alterações evidentes e a laranja os edifícios sem indícios de intervenções. O nome das formações geológicas encontra-se descrito abaixo de cada conjunto de dados.

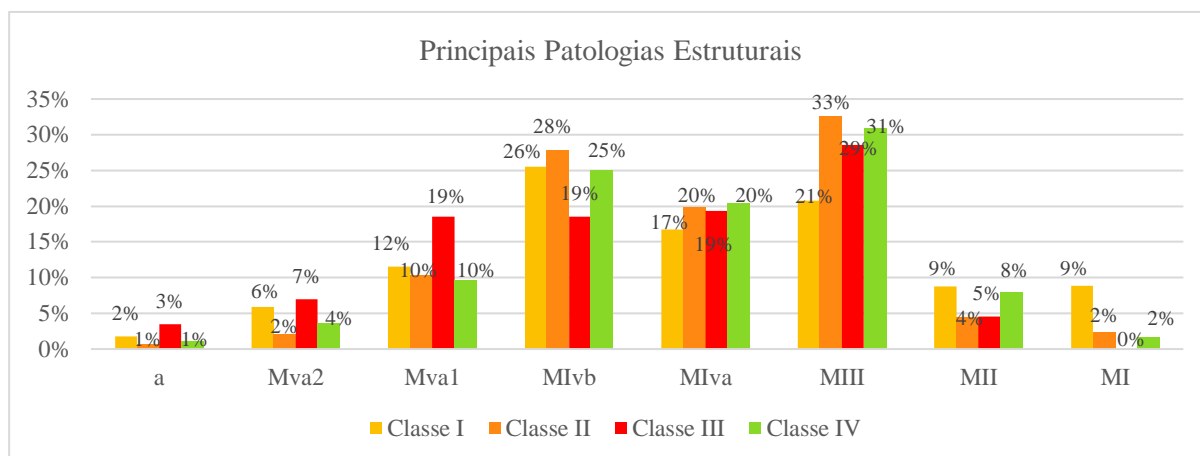


Figura 4.10: Gráfico com a distribuição das classes de patologias identificadas em cada edifício durante o trabalho de campo e a sua localização sobre a geologia da área de estudo. A amarelo encontrasse representada a Classe I (fissuras), a laranja a Classe II (empolamento, fendas, reboco em desagregação e pavimentos desnivelados), a vermelho a Classe III (assentamento, fendas com desaparecimento da fachada e desagregação do material de alvenaria) e a verde a quarta classe (sem patologias) de patologias estruturais. O nome das formações geológicas encontra-se descrito abaixo de cada conjunto de dados.

Por fim, é importante salientar que, apesar de ter sido realizada uma normalização tendo em conta a área de afloramento de cada formação geológica, continua a haver uma influência significativa de algumas formações. Isto deve-se ao facto de a recolha de dados ter sido limitada às zonas já identificadas como susceptíveis, que relaciona factores geológicos e geomorfológicos da região onde o edificado está disposto. É por esta razão que o número de edifícios e os respectivos dados recaem, na sua maioria, sobre as formações de M_{va1} , M_{IVb} , M_{IVa} e M_{III} (M_{CV} , M_{QB} , M_{FT} e M_{Ec}) (Fig.4.10) e sobre as zonas de declive mais acentuado. Em contraste, as formações que ocupam uma menor área da freguesia ou que se posicionam em zonas de declives baixos encontram-se menos representadas, uma vez que nestas condições a susceptibilidade é baixa ou inexistente o que não justifica a recolha de dados.

4.2.3. Muros de Suporte

Ao longo das áreas observadas foram recolhidos dados e caracterizados, segundo a síntese da Tabela 4.2, 35 muros de suporte. Destes 35, 74% eram muros de gravidade de betão simples, seguindo-se os muros de gravidade de pedra (14%), muros de gravidade em betão armado (9%) e muros consola/parede ancorada (3%).

De modo geral, os muros apresentavam um bom estado de conservação (69%) e apenas 26% e 6% foram classificados em estado médio e deficiente, respectivamente (Tabela 4.3). Dos 35 muros (Fig.4.11), 83% não apresentavam indícios de intervenções/ alterações recentes, em contraste com os restantes 17% que apresentavam indícios. Estes 17% também não apresentam qualquer tipo de patologia incidente, estando inseridos na Classe IV. A Classe I e II apresentam igual representação, 37%, e por fim, a Classe III compreende 9% dos muros.

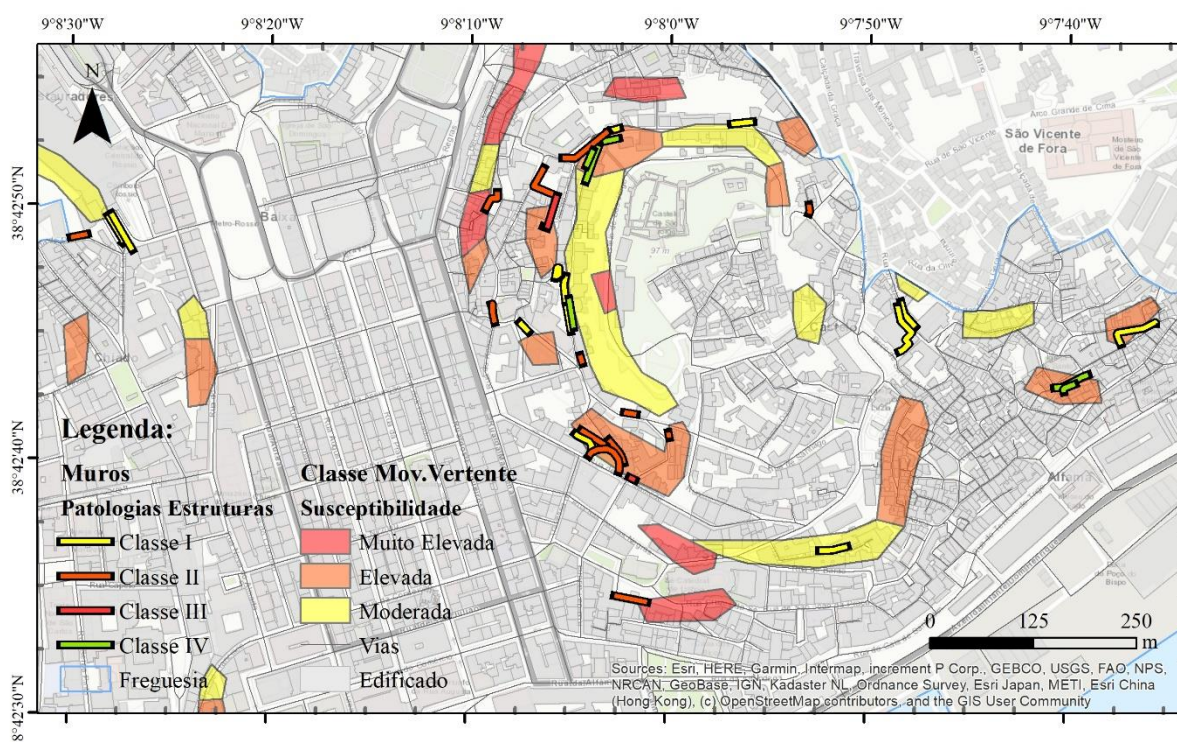


Figura 4.11: Distribuição dos muros observados durante a campanha de campo e identificação das patologias estruturais dominantes descritas. Destaque para a sua posição relativamente à localização das zonas de susceptibilidade identificadas pela CML.

Relativamente ao número de patologias incidentes num mesmo muro, destaca-se a presença no máximo de duas patologias nas fachadas observadas. 37% dos muros apresentam mais do que uma patologia incidente, havendo a predominância de fissuras (Classe I) e fendas (Classe II) (Tabela 4.3). Para além destas, caracterizou-se a presença síncrona de: fissuras e reboco em desagregação; fissuras e empolamento; reboco em desagregação e desagregação do material de alvenaria.

Quanto à presença de estruturas de drenagem, apenas 34% apresentava drenos, sendo que 66% não tinham qualquer tipo de sistema de drenagem evidente. Este número pode dever-se ao facto de alguns dos muros observados não serem necessariamente estruturas de suporte, mas sim de delimitação de propriedade. Por fim, apenas num muro foram identificados equipamentos de monitorização (3%). Nos restantes 94% não havia qualquer monitorização e num dos muros (3%) não foi possível a recolha de informação (Tabela 4.3).

Tabela 4.3: Síntese dos dados recolhidos sobre os muros de suporte na campanha de campo.

Muros de Suporte	Estado de Conservação	Intervenções Recentes	Principais Patologias	Estruturas de Drenagem	Instrumentos de Monitorização
Bom	68%				
Médio	26%				
Deficiente	6%				
Sim		17%		34%	3%
Não		83%		66%	94%
S/Info.		0%		0%	3%
Classe I			37%		
Classe II			37%		
Classe III			9%		
Classe IV			17%		

5. Relatórios Geológicos e Hidrogeológicos

Uma das fontes de dados utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho foram os relatórios geológicos/ geotécnicos e hidrogeológicos realizados até Junho de 2019, na Freguesia de Santa Maria Maior, informação presente na base de dados GeoSIG cedida pela CML. Destes relatórios retiraram-se algumas das variáveis necessárias para o desenvolvimento dos modelos geológicos e hidrológicos, assim como dados que permitiram perceber as características locais em profundidade.

5.1. Níveis de Água

Um dos dados mais importantes para este trabalho é a profundidade à qual se encontra o nível de água ao longo da freguesia, uma vez que a presença ou ausência de água pode condicionar de maneira muito importante o desencadeamento de movimentos de vertente.

Foram analisados vários relatórios, geológicos/ geotécnicos e hidrogeológico, dos quais se recolheu e organizou as informações referentes a medições de níveis de água. Da análise dos vários relatórios é possível verificar que as condições de medição variam de forma significativa, pelo que, se torna necessário descrever qual a metodologia utilizada na altura de seleccionar os valores mais fiáveis. Nos relatórios são fornecidos valores referentes à primeira ocorrência detectada aquando da realização do furo, valores estabilizados, valores piezométricos e valores de recuperação. Como algumas destas medições apresentam maior precisão, registando valores mais fiáveis e com uma representação mais aproximada do posicionamento real dos níveis de água, optou-se pela recolha preferencial dos valores medidos em piezómetros, seguindo-se dos valores estabilizados e recuperados. Só na ausência desta informação se recorreu ao uso dos valores medidos na altura da realização do furo, pois estes podem estar condicionados pela água de furação, havendo a hipótese de não representarem o nível real.

Os dados recolhidos foram tratados e, posteriormente, divididos consoante a precipitação acumulada mensal registada na altura da realização do furo. Com esta divisão pretende-se evidenciar a possível relação entre os níveis de água medidos e a precipitação mensal acumulada registada (Anexo 10). Os dados foram divididos em 4 classes, valores de precipitação acumulada mensal menores ou iguais a 50 mm, de 50 a 100 mm, de 100 mm a 200 mm e para valores maiores que 200 mm.

5.1.1. Distribuição dos Níveis de Água

Foram recolhidos dados de 664 sondagens, dos quais 263 apresentavam furos secos ou sem informação disponível e 401 apresentavam furos com um ou mais níveis de água detectados. A localização e os valores de todos os níveis de água detectados pode ser observada no mapa da Figura 5.1. É evidente que, a maior parte dos furos terá sido realizada no Esteiro da Baixa, Martim Moniz e na margem do rio Tejo, que correspondem a zonas de cobertura aluvionar e de aterros, onde os níveis de água tendem a ser mais superficiais. Pontualmente, as medições são feitas noutros locais, onde é possível destacar níveis de águas mais profundos, muito associados ao contexto geológico e hidrogeológico em que foram realizados.

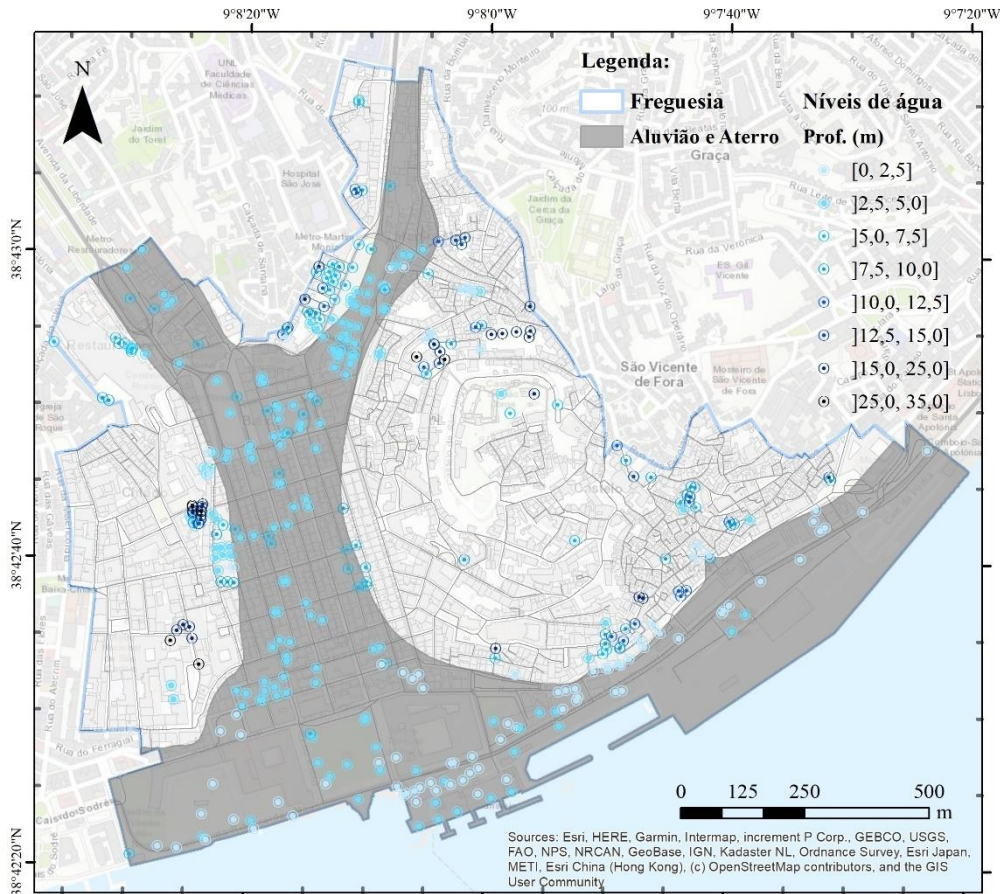


Figura 5.1: Localização dos níveis de água detectados nas sondagens realizadas na freguesia, com a identificação da profundidade à qual o primeiro nível foi encontrado. Destaque para a delimitação das formações geológicas de aterros/ aluviões.

Os níveis de água medidos, correspondentes ao nível de água mais superficial detectado, encontram-se compreendidos entre os 0 e os 33m de profundidade, sendo a média dos valores posicionada aos 6.05m e a mediana aos 4m. Quando se dividem os valores em classes (Figura 5.1 e 5.2) é possível verificar que, a maioria dos níveis, dispõem-se entre os 2.5 e os 5m de profundidade, e a classe com menor representação posiciona-se entre os 25 e os 35m. É notório que, o aumento da profundidade corresponde a uma diminuição dos níveis de água encontrados, o que se pode justificar pelo contexto geológico em que os furos foram realizados ou pelo facto da maioria dos furos não se estender até profundidades tão elevadas (média 19.5m, mediana 18m, estando apenas 50% dos dados compreendidos entre 10 e os 35m de profundidade). Ainda é importante destacar que, estes valores correspondem à ocorrência mais superficial, pelo que a existência de um nível a esta profundidade não invalida a existência de outros níveis mais profundos.

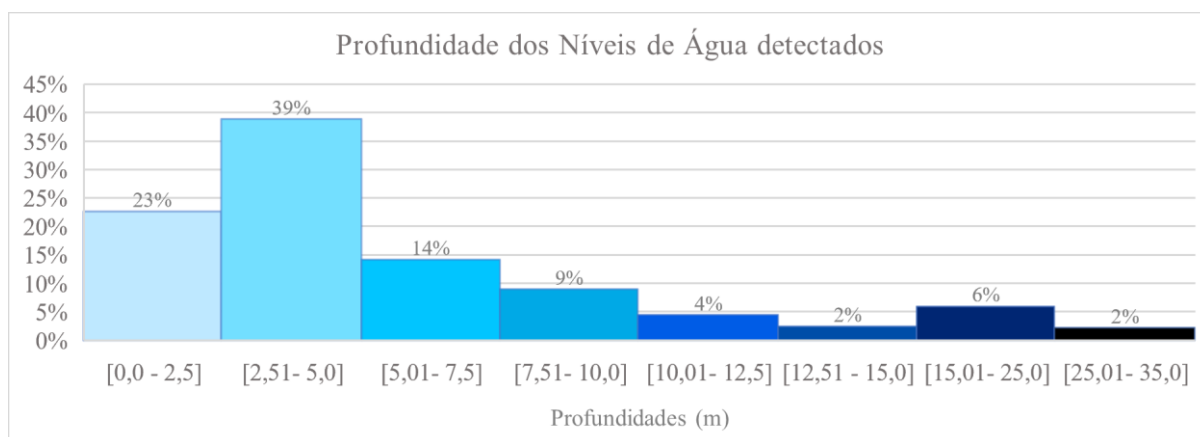


Figura 5.2: Gráfico com a distribuição dos primeiros níveis de água detectados na área de estudo, agrupados em classes.

5.1.2. Níveis de Água vs. Precipitação

Realizando uma análise geral da distribuição dos níveis de água e da precipitação (Tabela 5.1) é possível tirar as seguintes conclusões:

- A mediana das profundidades a que os níveis foram detectados tende a diminuir conforme se dá o aumento da precipitação registada, excepto para a precipitação maior que 200 mm;
- Com o aumento da precipitação mensal tende a ocorrer um aumento da representação dos valores de níveis de água mais superficiais e a diminuição dos níveis de água mais profundos;
- Para os níveis de água medidos em meses de precipitação mensal superiores a 200m, surge uma excepção ao anunciado anteriormente. Sendo esta uma amostra de dimensão muito pequena, relativamente às outras, os valores obtidos tendem a sofrer uma grande influência de valores extremos, a qual não permite considerar os resultados como viáveis.

Com estes dados torna-se possível evidenciar uma possível relação entre os níveis de água medidos na freguesia e a precipitação registada, pelo que existem zonas onde a precipitação poderá influenciar significativamente o nível de água no solo podendo ter um contributo importante no desencadeamento de movimentos em vertentes.

Tabela 5.1: Síntese dos dados referentes aos níveis de água medidos para cada classe de precipitação mensal acumulada, divididos por oito classes de profundidades.

Precipitação (mm)	PP < 50	50 < PP ≤ 100	100 < PP ≤ 200	PP > 200
n	207	131	45	18
Mediana	4,2	4,2	3,70	4,56
Prof.				
[0, 2,5]	27 %	20 %	11 %	22 %
]2,5; 5,0]	29 %	46 %	67 %	33 %
]5,0; 7,5]	12 %	18 %	9 %	22 %
]7,5; 10,0]	10 %	5 %	13 %	11 %
]10,0; 12,5]	8 %	0 %	0 %	6 %
]12,5; 15,0]	2 %	4 %	0 %	0 %
]15,0; 20,0]	6 %	2 %	0 %	0 %
]20,0; 35,0]	5 %	5 %	0 %	6 %

5.2. Depósitos de Cobertura

Com base nos dados descritos nas sondagens procedeu-se à recolha dos valores das profundidades até à qual se encontram materiais de cobertura, aterros e aluviões. Para esta análise foram recolhidos e mapeados dados de 663 sondagens, que foram submetidos a uma interpolação com recurso à ferramenta *inverse distance weighting* (IDW) dando origem ao mapa da Figura 5.3, onde é possível verificar a distribuição dos depósitos de cobertura em profundidade na área de estudo.

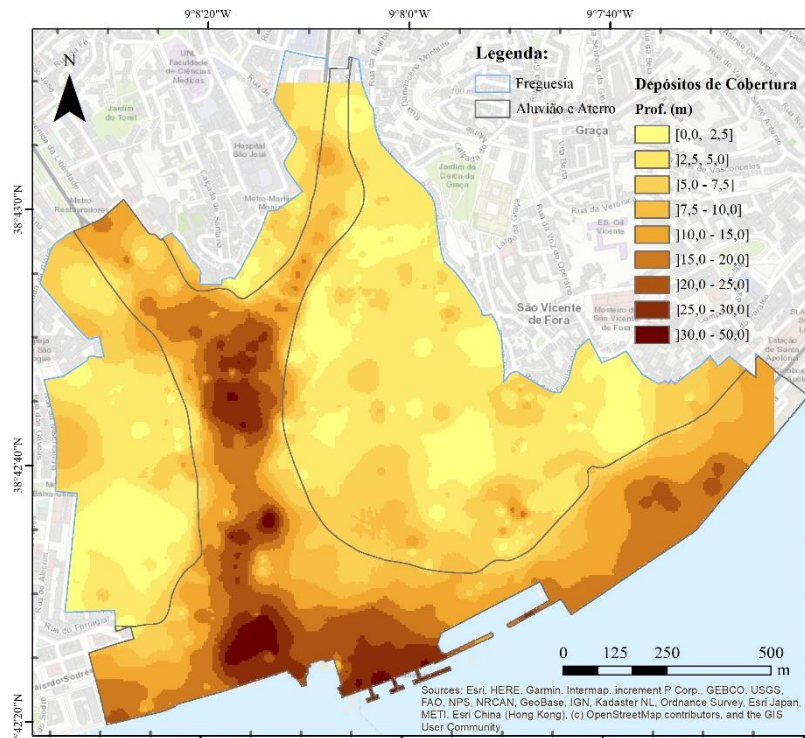


Figura 5.3: Distribuição da espessura dos depósitos de cobertura (aterros e aluviões) ao longo da área de estudo. Destaque para a delimitação da formação de aterros/ aluviões, segundo o enquadramento geológico.

É possível constatar que as espessuras variam entre 0m, onde não existem depósitos de cobertura e as formações miocénicas encontra-se expostas à superfície, até aos 46m de profundidade. A mediana está posicionada aos 5,9m de profundidade. Agrupando os valores em classes, gráfico da Figura 5.4, verifica-se que as classes mais superficiais (até 7,5m de profundidade) são as que apresentam maior representação, contendo mais de 50% dos dados. Conforme se dá um aumento da profundidade tende a verificar-se uma diminuição gradual das observações.

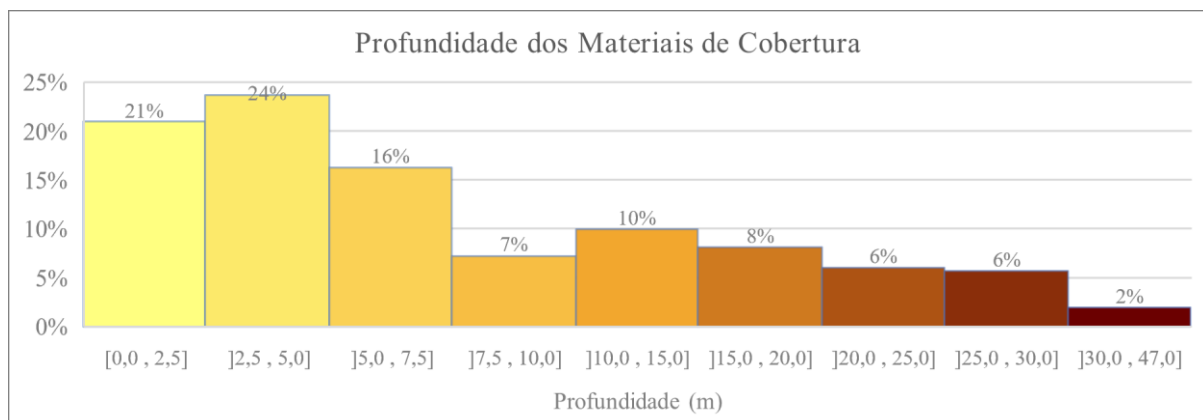


Figura 5.4: Gráfico com a distribuição da profundidade até à qual se prolongam os materiais de cobertura na área de estudo, organizada em classes.

Comparando estes dados com o mapa geológico da freguesia constata-se que existe uma associação entre os depósitos de cobertura mais profundos e o posicionamento dos aterros/ aluviões (Figura 5.3). Por sua vez, nas zonas onde o substrato miocénico está presente ocorre uma diminuição do material de cobertura, destacando-se nestes locais, as zonas onde os depósitos de cobertura são pouco espessos.

5.3. Zonamento Geotécnico

Os ensaios de Penetração Dinâmica (“*Standard Penetration Test*”, SPT) têm como objectivo a determinação, em profundidade, da resistência dos solos à penetração dinâmica com um amostrador normalizado, através do número de pancadas necessárias para que este penetre no terreno um determinado comprimento (N_{SPT}). Simultaneamente, permite a identificação do tipo de solo, através da análise das amostras remexidas, possibilitando o reconhecimento geotécnico (Afonso, 2016). Este ensaio é utilizado, principalmente, para a determinação dos parâmetros de resistência e de deformação de solos não coesivos (solos granulares), podendo também ser aplicados a outros tipos de solos.

Tendo em conta os ensaios SPT realizados nas sondagens, procedeu-se à recolha da profundidade até à qual os valores de N_{SPT} são inferiores ou iguais a 10. Esta gama de valores corresponde, segundo correlações dos valores de N_{SPT} com a compacidade de solos granulares e consistência de solos argilosos, a solos com baixa resistência à penetração dinâmica.

Utilizaram-se dados de 515 sondagens, os quais se distribuem entre os 0 e os 26m de profundidade, com mediana nos 3m. Observando a sua distribuição em classes (Figura 5.5) verifica-se que para esta gama de valores N_{SPT} , a distribuição é maioritariamente superficial. A classe dominante compreende solos à profundidade de 0 a 2.5m (37%), seguindo-se a classe dos 2.5 aos 5.0m (29%). Esta informação está de acordo com o expectável, uma vez que é reconhecida a menor resistência dos solos superficiais, muito associado a solos remexidos, alterados ou sujeitos a menor compressão, tal como Almeida (1991) já tinha descrito. Consoante aumenta a profundidade ocorre uma diminuição progressiva da representação destes solos menos resistentes. Tendo em conta que, a grande parte das sondagens foram realizadas em zonas aluvionares e de aterro, é possível constatar que as profundidades mais elevadas registadas se encontram, tal como na distribuição dos depósitos de cobertura, associados a estas formações.

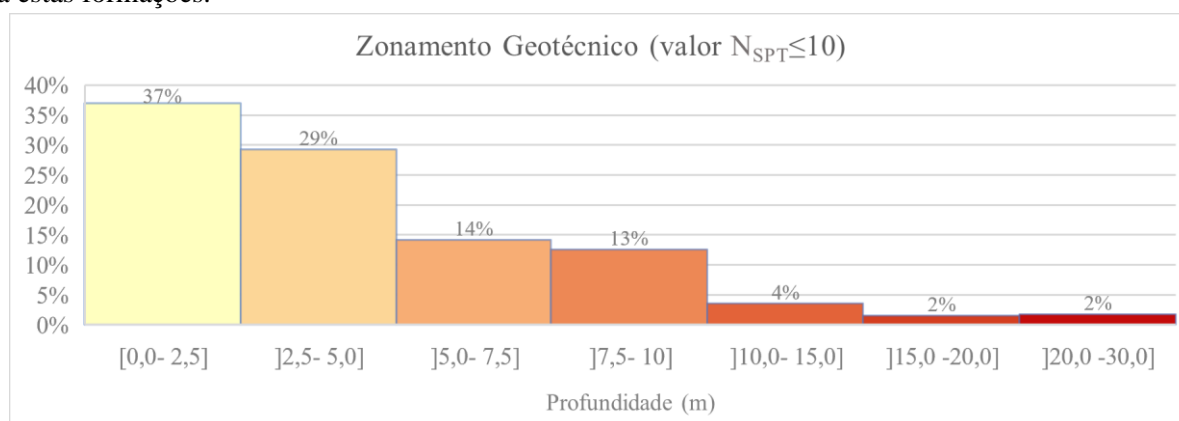


Figura 5.5: Gráfico com a distribuição da profundidade à qual foram detectados solos com valor de N_{SPT} menor ou igual a 10, agrupados em classes.

5.4. Resistência à Penetração Dinâmica

Ainda com os resultados dos ensaios SPT, procedeu-se à avaliação da variação dos valores deste ensaio a várias profundidades. Utilizou-se os dados de sondagens a profundidades de 3m, 5m, 10m e 15m e procedeu-se ao seu mapeamento utilizando o método de interpolação IDW em ambiente SIG.

5.4.1. Valores de N_{SPT} até à profundidade de 3m

Para o mapeamento dos valores de N_{SPT} à profundidade de 3m foram utilizados dados de 521 sondagens. A esta profundidade os valores de menor resistência são mais frequentes, destacando-se a classe de N_{SPT} dos 0 a 5 com o maior número (26%) (Figura 5.6 e 5.7). Conforme aumenta a resistência tende a ocorrer uma diminuição progressiva da representação, com excepção da classe das 50 a 60 (14%). Na Figura 5.6 é possível posicionar estes valores em associação à geologia. A menor resistência dos solos encontra-se, novamente, associada aos locais onde existe cobertura aluvionar ou de aterro e os valores mais elevados às formações Miocénicas. A esta profundidade a resistência média é de 19.5 e a mediana de 11, indicando que, no geral, os solos apresentam um comportamento com baixa resistência.

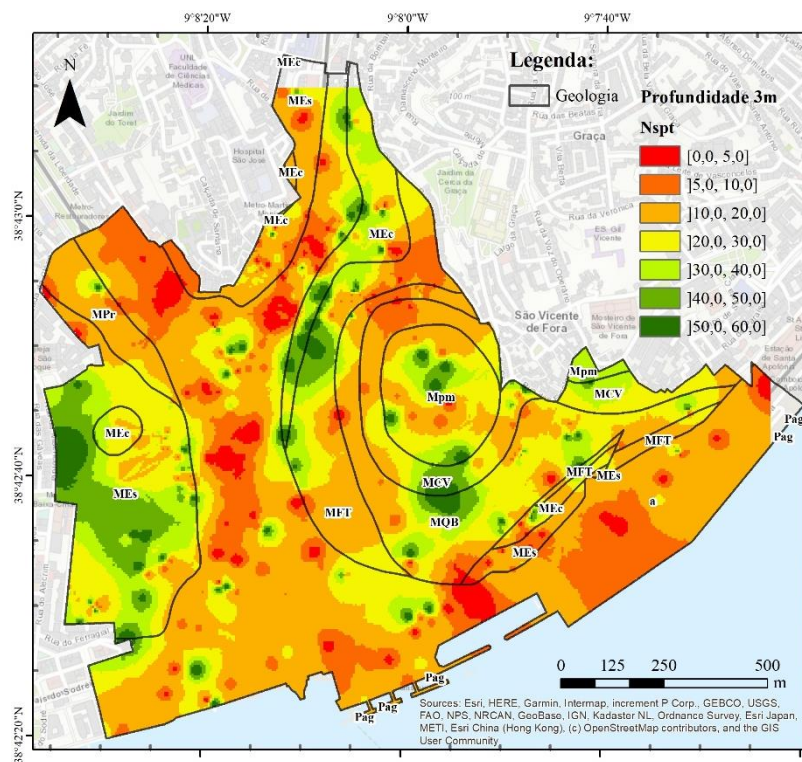


Figura 5.6: Distribuição dos valores de N_{SPT} à profundidade de 3m. Destaque para a delimitação dos limites geológicos da área de estudo.

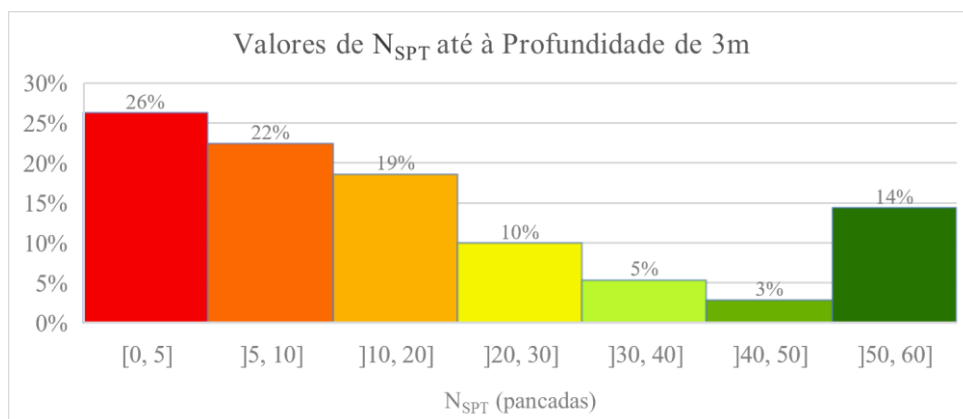


Figura 5.7: Gráfico com a distribuição em classes dos valores de N_{SPT} medidos à profundidade de 3m.

5.4.2. Valores N_{SPT} entre os 3 e 5m de profundidade

Para o mapeamento dos valores de N_{SPT} entre os 3 e 5m de profundidade foram utilizadas 516 sondagens, obtendo-se o mapa da Figura 5.8. Conjugando a informação do mapa com a do gráfico da Figura 5.9 é visível que, as classes de N_{SPT} mais abundantes são as das 10-20 e 50-60 (ambas com 22%). Segue-se as classes de N_{SPT} de menor resistência, dos 0-5 e 5-10 (com 18 e 15%, respectivamente). A esta profundidade continua a haver uma abundância de solos de baixa resistência, com valores de N_{SPT} menores de 20 mas, regista-se também, um aumento dos solos de maior resistência. É possível destacar, agora com maior contraste, os solos de menor resistência a delimitar as formações aluvionares e aterros, e os solos mais resistentes, coincidentes com o traçado das formações Miocénicas. O valor de N_{SPT} médio é de 25 e a mediana de 18.

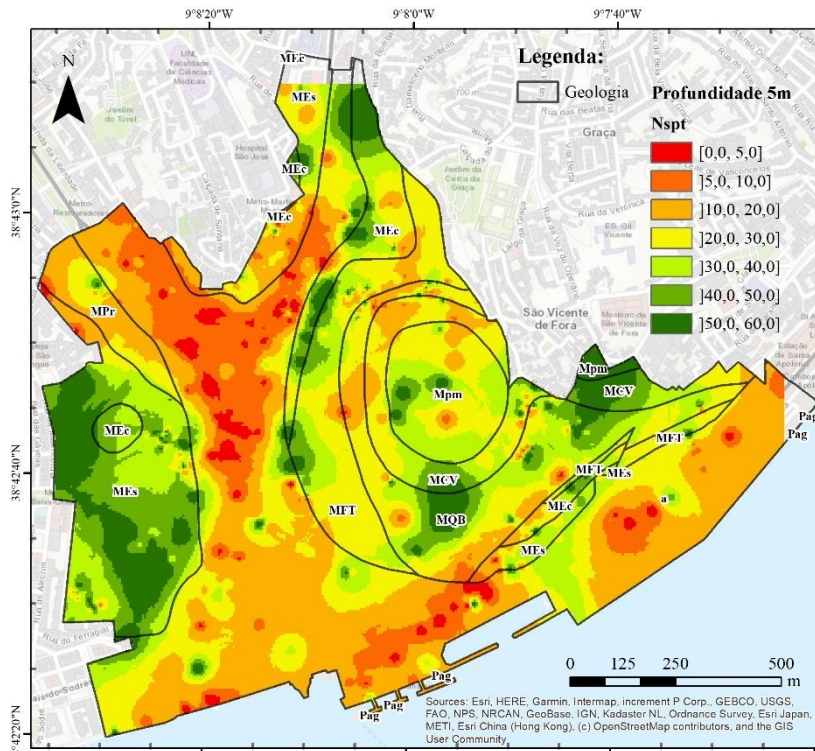


Figura 5.8: Distribuição dos valores de N_{SPT} à profundidade de 3 a 5m. Destaque para a delimitação dos limites geológicos da área de estudo.

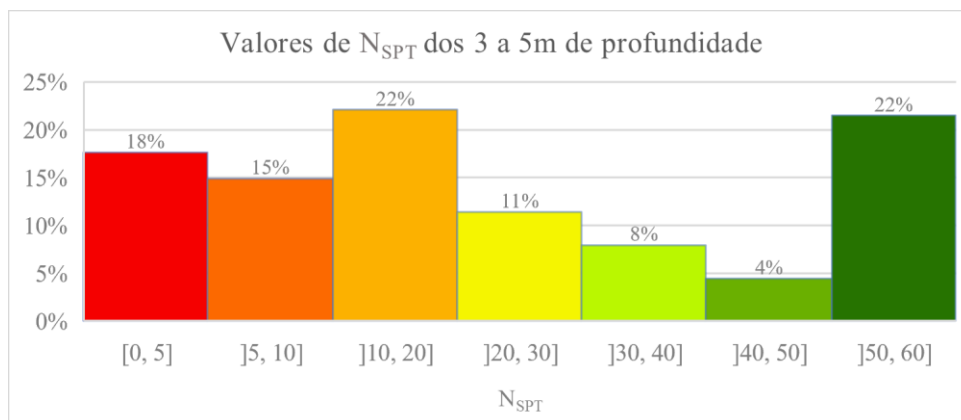


Figura 5.9: Gráfico com a distribuição em classes dos valores de N_{SPT} medidos à profundidade de 3 a 5m.

5.4.3. Valores N_{SPT} entre 5 e 10m de profundidade

Para a profundidade compreendida entre os 5 e os 10m foram utilizadas 444 sondagens que permitiram o mapeamento dos valores de N_{SPT} (Figura 5.10). Recorrendo ao mapa da Figura 5.10 e ao gráfico da Figura 5.11 é perceptível que ocorre uma diminuição significativa da representação de todas as classes de menor resistência e a classe de maior resistência passa a conter cerca de 40% dos dados totais. Esta diminuição mostra que, a esta profundidade tende a ocorrer um aumento da resistência geral dos solos. O valor N_{SPT} médio é de 36 e a mediana de 37, o que também comprova este aumento de resistência. Os valores de N_{SPT} mais baixos continuam coincidentes com as formações aluvionares e aterros, mas começam a estar confinados a locais específicos, por exemplo ao leito do rio Tejo. Os valores de N_{SPT} mais altos apresentam uma distribuição mais generalizada, continuando a evidenciar a maior resistência das formações miocénicas, mas também o aumento da compactidade dos solos.

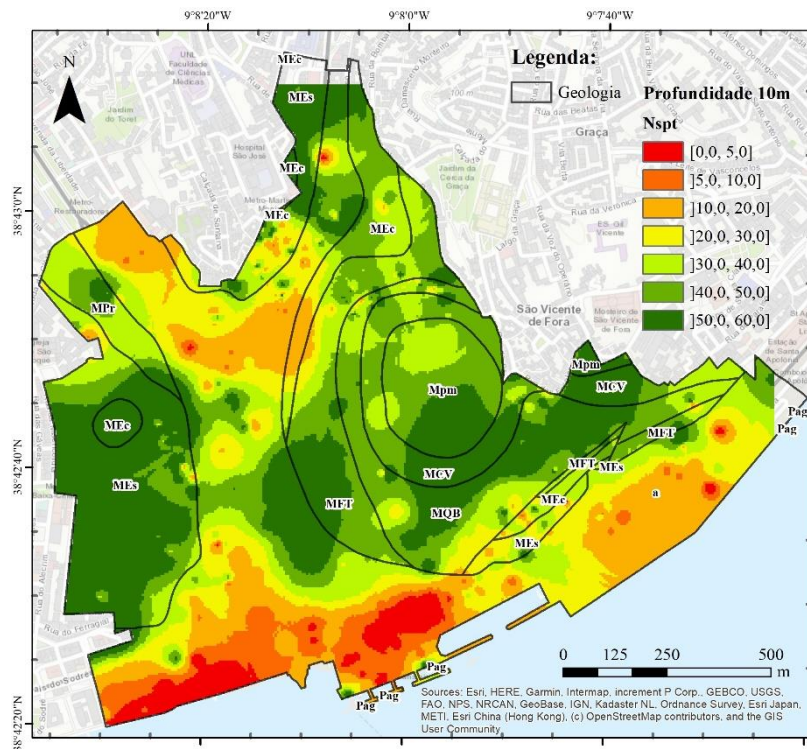


Figura 5.10: Distribuição dos valores de N_{SPT} à profundidade entre os 5 e os 10m. Destaque para a delimitação dos limites geológicos da área de estudo.

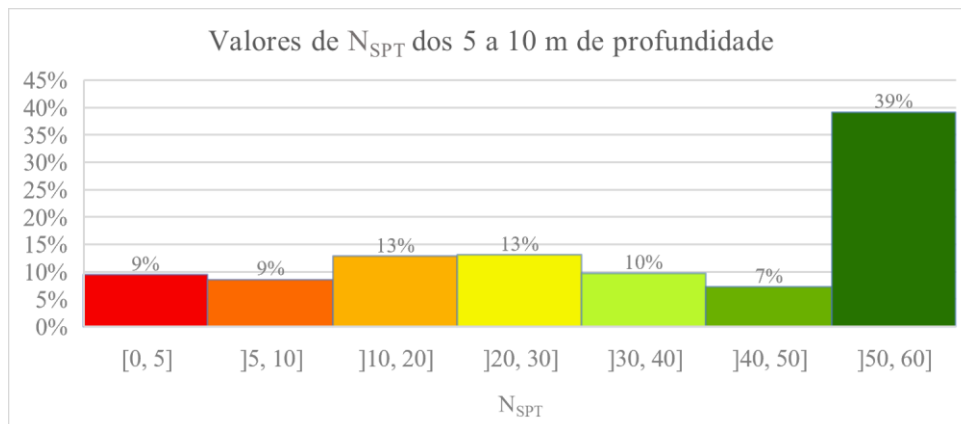


Figura 5.11: Gráfico com a distribuição em classes dos valores de N_{SPT} medidos à profundidade de 5 a 10m.

5.4.4. Valores de N_{SPT} entre os 10 e 15m de profundidade

Por fim, para o mapeamento dos valores de N_{SPT} entre os 10 e os 15m de profundidade foram utilizados dados de 354 sondagens, obtendo-se o mapa da Figura 5.12. Para esta profundidade é evidente um destaque da classe de N_{SPT} entre 50-60, contendo 41% dos resultados (Fig.5.13). As classes de menor resistência apresentam todas uma representação menos significativa e as classes com valores de N_{SPT} entre 10 e 40 assumem valores bastante idênticos entre si. Os valores de N_{SPT} menores que 30 passam a posicionar-se, na sua maioria, nas formações aluvionares e aterros, representando um aumento da resistência destas formações com o aumento da profundidade. Apenas em casos pontuais ocorrem valores de N_{SPT} inferiores a 10, posicionados quase sempre nas zonas aluvionares. Os valores de N_{SPT} mais altos surgem novamente coincidentes com o traçado das formações miocénicas, demarcando a sua resistência elevada, agora sem qualquer influência de solos superficiais alterados e descomprimidos.

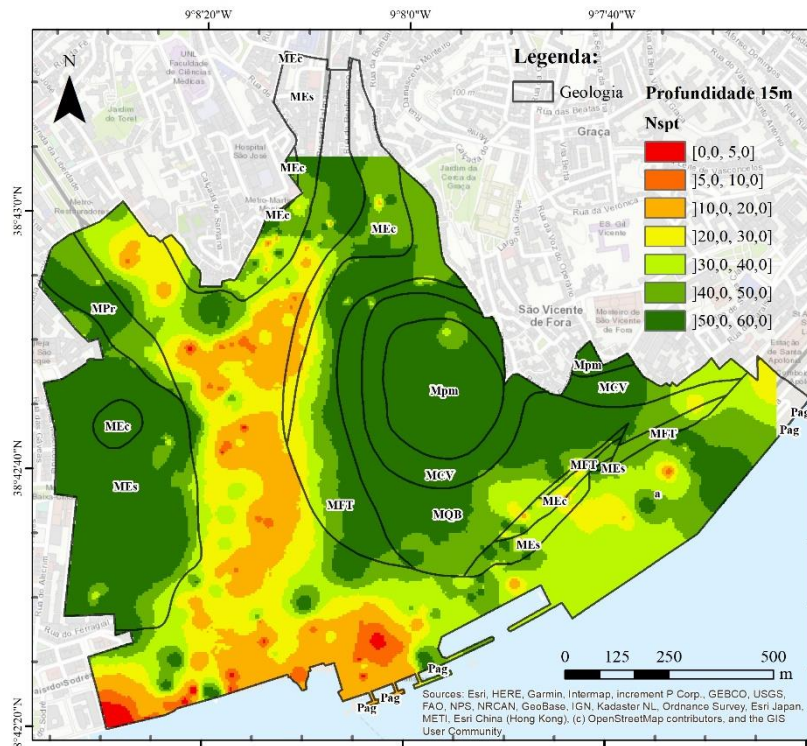


Figura 5.12: Distribuição dos valores de N_{SPT} à profundidade entre os 10 e os 15m. Destaque para a delimitação dos limites geológicos da área de estudo.

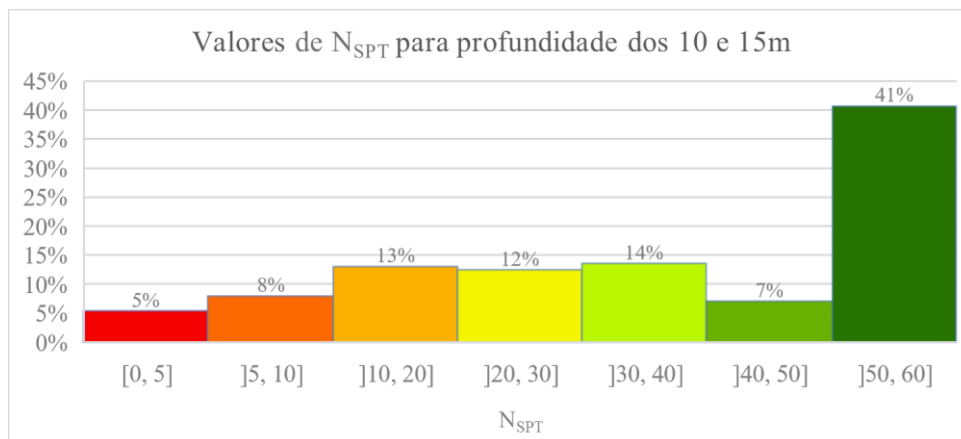


Figura 5.13: Gráfico com a distribuição em classes dos valores de N_{SPT} medidos à profundidade de 10 a 15m.

5.4.5. Variação Geral em Profundidade

Tendo em conta as observações realizadas anteriormente, acerca das variações da resistência à penetração dinâmica em profundidade, torna-se possível retirar algumas conclusões:

- Superficialmente a resistência dos solos tende a ser baixa, destacando-se uma abundância de valores de N_{SPT} inferiores a 20. Estes dados refletem a existência de solos superficiais de baixa resistência, descomprimidos e alterados, podendo estes ser aterros, aluviões ou formações miocénicas;
- Conforme se dá um aumento da profundidade tende a ocorrer um aumento da resistência dos solos, representada pela diminuição dos valores de N_{SPT} inferiores a 20 e pelo aumento significativo da classe de maior resistência. Este aumento deve-se sobretudo à maior resistência dos solos e à diminuição dos efeitos de alteração das formações do substrato miocénico;
- Os padrões superficiais refletem assim, com maior evidência, a distribuição das formações de menor resistência como as aluviões e os aterros. Para além destes, podem também retratar a presença de um miocénico descomprimido e alterado com características de menor resistência. Já os padrões profundos refletem essencialmente a grande resistência das formações miocénicas.

5.5. Variáveis Geológicas

Para a elaboração dos modelos de susceptibilidade, surge a necessidade de recolha e tratamento das variáveis fundamentais à aplicação dos modelos geológicos e hidrogeológicos. As variáveis geológicas recolhidas são a coesão efectiva (c'), ângulo de atrito interno efectivo (ϕ'), o peso específico natural (γ), o peso específico saturado (γ_{sat}) e o peso específico submerso (γ_{sub}) do solo.

Estes dados foram recolhidos de relatórios geológicos/ geotécnicos e na bibliografia disponível. Posteriormente, procedeu-se à retroanálise dos mesmos, uma vez que, a maioria dos valores recolhidos diziam respeito a parâmetros de resistência das formações miocénicas em profundidade.

Para calibrar os valores dos parâmetros de resistência foi realizada retroanálise de movimentos tipo com as espessuras de solo instável deduzidas anteriormente, utilizando a fórmula do “Modelo do Talude Infinito” (Sharma, 2002). Nesta análise, assume-se que quando ocorre ruptura o factor de segurança assume valor igual a 1. Para cada formação geológica vão sendo alterados separadamente os valores de coesão e ângulo de atrito (características de resistência) até que se obtenha uma convergência do valor de factor de segurança. Assim, a retroanálise permite estimar as propriedades geotécnicas que dão origem a estes movimentos através de uma análise retroactiva das condições em que ocorrem (Pimenta, 2011).

5.5.1. Peso Específico do Solo

Na expressão para o cálculo do FS são necessários valores de peso específico, de entre os quais, o peso específico natural, saturado e submerso para as várias formações. Estes dados foram recolhidos, organizados, e, posteriormente, submetidos a uma análise de estatística descritiva. Comparando os dados dos relatórios geotécnicos com os dados anteriormente publicados, é possível verificar que existe uma semelhança, podendo por isto assumir-se que os valores se enquadram para o desenvolvimento do trabalho. No caso dos valores de peso específico saturado e submerso, utilizou-se os valores publicados por Sobral (2018), aos quais não se procedeu a qualquer alteração uma vez que estes apresentam uma baixa influência no valor final. Os dados finais encontram-se expressos na Tabela 5.2 e representados no Anexo 11, 12 e 13.

Tabela 5.2: Valores finais do Peso Específico Natural, Peso Específico Submerso e Peso Específico Saturado para as formações geológicas da área de estudo.

Formação		M_{Va2}	M_{Va1}	M_{IVb}	M_{IVa}	M_{III}	M_{II}	M_I	a, at
	CodSig	M_{pm}	M_{CV}	M_{QB}	M_{FT}	M_{Ec}	M_{Es}	M_{Pr}	a
γ	(kN/m ³)	17	19	17	19	20	17	19	16
γ_{sub}	(kN/m ³)	9,19	11,19	9,19	11,19	12,19	9,19	11,19	6,69
γ_{sat}	(kN/m ³)	19	21	19	21	22	19	21	16,5

5.5.2. Coesão e Ângulo de Atrito interno

A coesão e o ângulo de atrito são variáveis dadas pela equação de rotura de Coulomb que caracterizam a resistência dos solos e, por conseguinte, influenciam a localização da superfície de ruptura e o valor do valor de FS obtido (Mesri & Abdel-Ghaffar, 1993).

Os seus valores foram recolhidos dos relatórios geológicos/ geotécnicos e organizados por formações geológicas. Posteriormente, procedeu-se à sua análise por meio de estatística descritiva, obtendo-se os valores mais representativos para cada formação. Como, neste caso específico, os solos em causa apresentam-se descomprimidos, conclui-se que os valores descritos nos relatórios geotécnicos não seriam os mais adequados para caracterizar cada formação, pois correspondem a valores demasiado altos tendo em conta a característica dos solos superficiais ou do topo das formações miocénicas. Como tal, procedeu-se à sua retroanálise obtendo-se os finais, expressos na Tabela 5.3 e representados nos mapas dos Anexos 14 e 15.

Tabela 5.3: Valores finais de coesão e ângulo de atrito efectivo das formações geológicas da área de estudo, obtidas após retroanálise.

Formação		M_{Va2}	M_{Va1}	M_{IVb}	M_{IVa}	M_{III}	M_{II}	M_I	a, at
	CodSIG	M_{pm}	M_{CV}	M_{QB}	M_{FT}	M_{Ec}	M_{Es}	M_{Pr}	a
c'	(kN/m ²)	4	10	8	8	12	6	6	4
ϕ'	(graus)	30	34	32	20	36	30	26	24

5.6. Variáveis Hidrogeológicas

Para a aplicação do modelo hidrogeológico é necessário conhecer algumas variáveis hidrogeológicas das formações, de modo a descrever as suas aptidões hidrogeológicas. As variáveis necessárias são a condutividade hidráulica (k) e transmissividade (T), que é dada pelo produto da permeabilidade pela espessura de solo potencialmente instável. Para a obtenção dos valores de condutividade hidráulica procedeu-se à recolha de dados em relatórios hidrogeológicos, geológicos/ geotécnicos e em trabalhos publicados. Os dados recolhidos foram, organizados e comparados de maneira a obter valores padrão representativos de cada uma das formações, Tabela 5.4 e Anexo 16.

Utilizando estes dados, calculou-se o valor da transmissividade em ambiente SIG, para cada pixel. Este nível de informação pode ser consultado no mapa do Anexo 17.

Tabela 5.4: Valores de conductividade hidráulica das formações geológicas da área de estudo.

Formações		k	
	CodSIG	(m/s)	(m/dia)
M_{Va2}	M _{pm}	2,00E-05	1,73E+00
M_{Va1}	M _{CV}	7,00E-06	6,05E-01
M_{Irb}	M _{QB}	2,00E-05	1,73E+00
M_{Ira}	M _{FT}	2,00E-07	1,73E-02
M_{III}	M _{Ec}	7,00E-06	6,05E-01
M_{II}	M _{Es}	1,00E-05	8,64E-01
MI	M _{Pr}	2,00E-07	1,73E-02
a, at	a	1,00E-06	8,64E-02

6. Precipitação

A precipitação é um dos factores que influencia directamente a quantidade de água existente no solo. Como tal, torna-se necessário estudar e compreender como o seu valor variou ao longo do tempo, de modo a ser possível calcular os limiares de precipitação a partir dos quais tende a ocorrer o desencadeamento de movimentos de massa em vertente para a zona de estudo.

Os dados de precipitação utilizados foram medidos na estação meteorológica do Instituto Dom Luiz, no Jardim Botânico da Universidade de Lisboa, e correspondem a valores de precipitações diárias com extensão temporal de 1941 a 2019. Para estes dados realizou-se, primeiramente, uma observação da variação anual da série temporal disponível. Posteriormente, utilizou-se os dados de precipitação de modo a obter a variação da precipitação acumulada mensal. Estes dados foram correlacionados com os níveis de água medidos na freguesia, permitindo verificar se haverá alguma influência significativa da precipitação na posição dos níveis de água identificados em sondagens. A distribuição dos locais onde os níveis de água foram medidos e a precipitação acumulada mensal na altura de medição pode ser visível no mapa do Anexo 10.

Por último, e com o objectivo de obter os valores de precipitação efectiva que, para a freguesia, poderiam ter desencadeado movimentos de vertentes, foram trabalhados os dados de precipitação diária tendo em conta diferentes durações. As durações utilizadas encontram-se compreendidas entre 1 e 30 dias de precipitações intensas, valores que Zêzere *et al.* (2005) indica tenderem, na maioria dos casos, a gerar movimentos translacionais superficiais.

6.1. Precipitação Efectiva

Os dados de precipitação diária foram trabalhados de modo a verificar a distribuição da precipitação ao longo desta série temporal e permitindo a identificação dos seus limiares críticos. Com os valores diários procedeu-se ao cálculo dos limiares de precipitação para os quais se pode desencadear movimentos com recurso as expressões de Zêzere *et al.* (2005) (subcapítulo 2.4). Calculou-se assim, para vários cenários distintos, os limiares de precipitação crítica para duração de 1, 5, 10, 15 e 30 dias. Os valores obtidos estão expressos na Tabela 6.1 e serão os valores a utilizar para a aplicação do modelo hidrogeológico. Utilizando estes valores de C_r é possível destacar, na série temporal, os períodos em que os valores dos limiares foram excedidos (Tabela 6.2).

Tabela 6.1: Síntese dos dados precipitação acumulada e intensidade de precipitação calculados para uma duração de 1, 5, 10, 15 e 30 dias.

Duração (D em dias)	Precipitação Acumulada (Cr)		Intensidade Precipitação (Ri)	
	mm	m	mm/dia	m/dia
1	114,40	0,1144	84,30	0.0843
2	121,80	0,1218	56,79	0,0568
5	144,00	0,1440	33,68	0.0337
10	181,00	0,1810	22,69	0.0227
15	218,00	0,2180	18,01	0.0180
30	329,00	0,3290	12,13	0.0121

Tabela 6.2: Datas nas quais os limiares de precipitação crítica foram ultrapassados na região de Lisboa, para uma duração de 1, 2, 5, 10, 15 e 30 dias de precipitação contínua.

1 Dia	10 Dias	15 Dias	30 Dias
01/ Janeiro/ 1949	22-23/ Dezembro/ 1998	5-6/ Março/ 1947	23-26/ Fevereiro/ 1947
	26-29/ Novembro/ 1961	11/ Março/1962	1-11/ Março/ 1947
2 Dias	7-8/ Março/ 1962	11-18/ Dezembro /1963	16-27/ Dezembro/ 1963
20/ Outubro/ 1997	16-17/ Dezembro/ 1963	18/ Outubro/1965	18-24/ Outubro/ 1965
	11/ Fevereiro/1979	11-16/ Fevereiro/ 1979	26/ Outubro/ 1965
18-19/ Fevereiro/2008	15-16/ Fevereiro/ 1979	30/ Dezembro/ 1981 a 4/ Janeiro/ 1982	25-31/ Janeiro/ 1970
	30/ Dezembro/1981	19-26/ Novembro/ 1983	11-23/ Fevereiro/ 1979
5 Dias	17/ Novembro/1983	16-19/ Dezembro/ 1989	19/ Novembro a 5/ Dezembro/ 1983
12-13/ Fevereiro/1979	19-25/ Novembro/ 1983	22-23/ Dezembro/ 1989	9/ Dezembro/ 1989 a 4/ Janeiro/ 1990
31/Dezembro/1981	13/ Dezembro/1989	26/ Dezembro/ 1989	09/ Janeiro/ 1996
19-21/ Novembro/ 1983	22-23/ Outubro/ 1990	26-28/ Outubro/ 1990	11-30/ Janeiro/ 1996
	01/ Janeiro/1996	1-2/ Janeiro/ 1996	1-7/ Fevereiro/ 1996
21-23/ Outubro/ 1997	22/ Dezembro/1996	5-6/ Janeiro/ 1996	8-11/ Janeiro/ 1997
	24-25/ Dezembro/1996	09/ Janeiro/ 1996	6-18/ Novembro/ 1997
06/ Novembro/1997	27-28/ Outubro/ 1997	2-27/ Dezembro/ 1996	24/ Novembro a 1/ Dezembro/ 1997
22/ Outubro/1999	10-11/ Janeiro/ 1997	02/ Novembro/ 1997	17-18/ Janeiro/ 2001
24/ Outubro/1999	24-29/ Outubro/ 1999	1-3/ Janeiro/ 2001	13-16/ Janeiro/ 2010
31/ Outubro a 2/ Novembro/ 2010	29/ Dezembro/2000	05/ Janeiro/ 2001	20/ Janeiro/ 2010
	25-27/ Outubro/ 2006	01/ Fevereiro/ 2009	12-16/ Março/ 2010
24-26/ Outubro/ 2013	21/ Fevereiro/2010	25/ Fevereiro a 1/ Março/ 2010	15-21/ Novembro/ 2011
	23/ Fevereiro/2010	06/ Março/ 2010	
	08/ Março/2010	8-9/ Março/ 2010	
	24-30/ Outubro/ 2013	09/ Novembro/ 2011	

7. Ocupação e Uso do Solo

Anteriormente, foi abordado como o uso e ocupação do solo podem influenciar drasticamente a infiltração da água da chuva (subcapítulo 3.5). Por este motivo, torna-se necessário cartografar os diferentes usos e ocupações do solo na freguesia e a identificação dos respectivos factores de infiltração.

A freguesia de Santa Maria Maior apresenta uma área completamente urbanizada sendo difícil encontrar locais que não tenham sofrido qualquer intervenção humana. Deste modo, separou-se as áreas urbanizadas segundo a metodologia utilizada por Vasconcelos (2011). O autor dividiu o concelho de Lisboa em 5 classes de ocupação do solo: edificado; espaço parcialmente ou totalmente impermeabilizado; vias de comunicação; espaço ocupado por vegetação arbórea; espaço ocupado por vegetação rasteira ou arbustiva. Neste caso, apenas se considerou uma única classe de zonas vegetadas, visto a sua representação ser mínima na área de estudo.

Para a delimitação destas classes utilizou-se dados fornecidos pela CML, referentes ao edificado, vias e espaços verdes. A informação dos espaços verdes foi completada através da observação de imagens de satélite. A informação das zonas de impermeabilização urbana foi extraída através da remoção das restantes classes ao layer da freguesia. O mapa de uso e ocupação do solo está representado na Figura 7.1 e as áreas total ocupada por cada classe na Tabela 7.1.

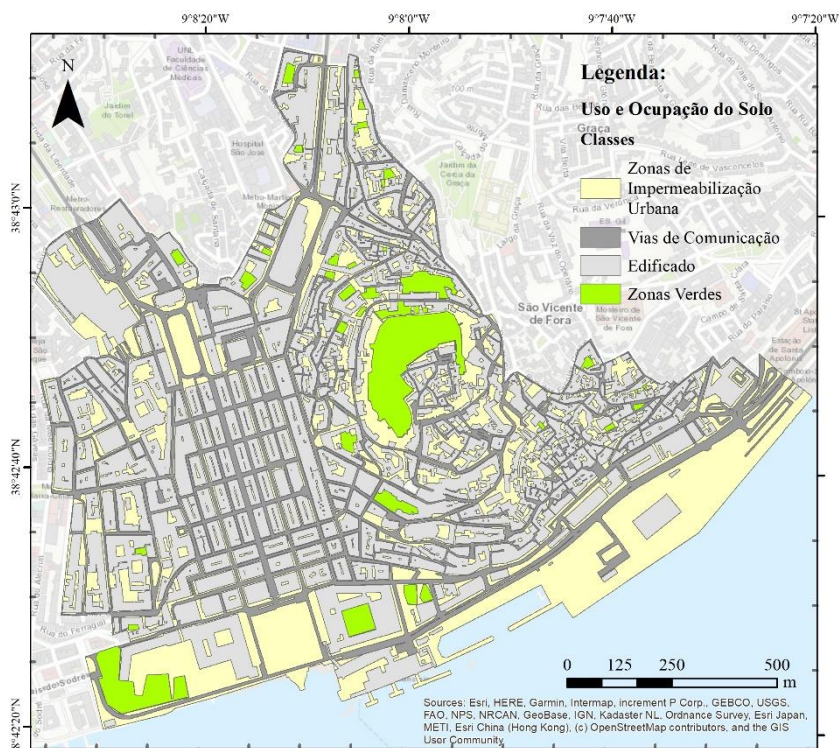


Figura 7.1: Distribuição dos diferentes usos e ocupação do solo na área de estudo.

Tabela 7.1: Área ocupada por cada classe de uso e ocupação do solo na área de estudo.

Uso e Ocupação do Solo	Área Ocupada (km ²)
Zona de Impermeabilização Urbana	0,473
Vias de Comunicação	0,257
Zonas Edificadas	0,721
Zonas Verdes	0,065
Total	≈ 1,5

7.1. Factor de Infiltração

O factor de infiltração representa a quantidade de precipitação que se infiltra no solo consoante o seu uso e ocupação. Este factor foi adicionado por Vasconcelos (2011) à equação de Montgomery & Dietrich (1994) de forma a contabilizar a influência de um solo urbanizado no desenvolvimento do modelo hidrogeológico.

O factor de infiltração irá assim depender do uso e ocupação do solo da freguesia uma vez que, esta ocupação influencia directamente a quantidade de água que se infiltra. Mantendo a metodologia utilizada por Vasconcelos (2011), para cada classe de uso do solo foi definida uma percentagem de precipitação efectiva que se admite no solo. Para o edificado o autor considerou que “a percentagem de precipitação efectiva que se infiltra dos pixéis adjacentes para o pixel onde se encontra o edificado foi de 15% da precipitação total”. As zonas ocupadas por vias de comunicação irão ter um valor idêntico ao edificado, 15%. Para as zonas de impermeabilização urbana, sem que haja distinção entre as várias zonas que podem existir, considerou-se que 45% da precipitação total irá sofrer infiltração. E por fim, para as zonas verdes, foi utilizado um valor de 100% (Figura 7.2).

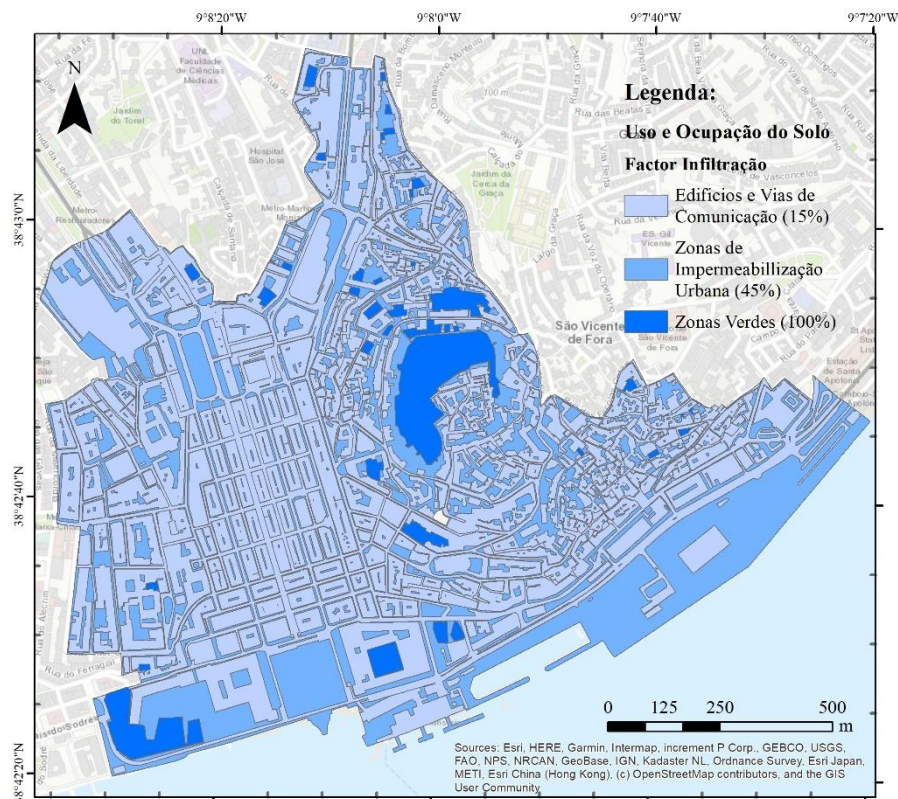


Figura 7.2: Distribuição dos valores referentes ao factor de infiltração (fi) ao longo da área de estudo, consoante a classificação do uso e ocupação do solo.

Posteriormente estes dados foram convertidos em formato matricial e utilizaram-se cenários de precipitação acumulada distintos, calculados anteriormente através da equação dos limiares de precipitação (Cr). Optou-se por utilizar um cenário de 1 dia de precipitação, sendo este valor dado de entrada na expressão do modelo *SHALSTAB*, representando a variável q , precipitação. Utilizou-se este cenário de precipitação pois, quando se trata de movimentos superficiais não faz sentido considerar cenários de precipitação mais prolongados do que 3 dias seguidos.

8. Área de Contribuição a Montante

A área de contribuição a montante é um dos factores que entra no modelo hidrológico, sendo fundamental para se conhecer a quantidade de precipitação que escoada cada pixel da área de estudo. Este nível de informação pode ser calculado com recurso às ferramentas hidrológicas do *SHALSTAB*, tendo como parâmetros de entrada o MDT e as linhas de fluxo superficiais calculadas. Os cálculos foram realizados em *ArcView 3.1*, compatível com o programa informático *SHALSTAB*. Como mapa final obteve-se a Figura. 8.1.

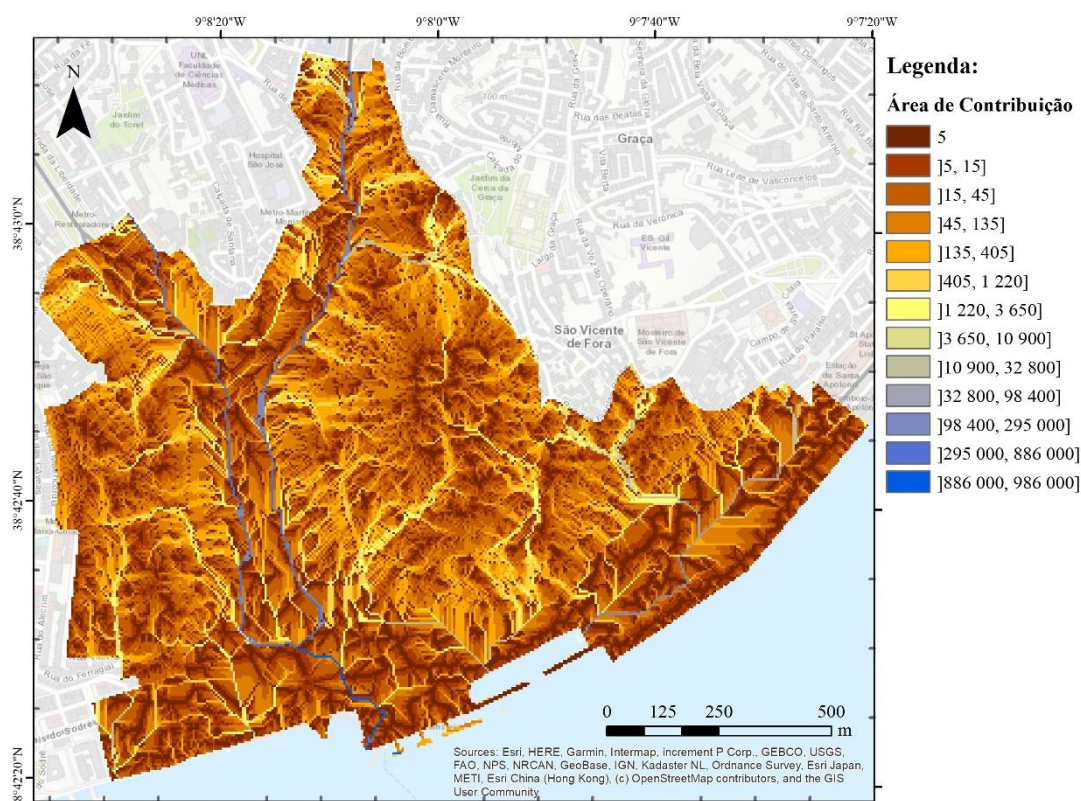


Figura 8.1: Distribuição dos valores referentes à área de contribuição a montante da área de estudo.

É possível constatar que os valores se distribuem entre o mínimo de 5m e um valor máximo de 986 000m. Os valores mais baixos encontram-se associados às zonas onde não há fluxo de água dos pixels adjacentes a montante, como por exemplo, nas zonas mais altas das colinas ou nas zonas planas. Os valores mais altos marcam as áreas onde ocorre maior concentração de fluxo, localizadas nos vales existentes. Os valores intermédios marcam locais de drenagem preferencial ao longo do relevo.

9. Espessura de Solo Potencialmente Instável

A determinação da espessura de solo potencialmente instável, solo que poderá ser mobilizado com o desencadeamento de um movimento de vertente, pode ser abordada de diversas maneiras, com recurso a modelos teóricos ou apenas a métodos mais simples e sistemáticos. Neste caso específico, estamos perante uma área urbanizada, com grandes alterações do solo, mas com uma grande diversidade de dados disponíveis em sondagens. É com recurso a esses dados e a correlações teóricas dos parâmetros geotécnicos e valores de N_{SPT} espectáveis que se construiu este nível de informação.

Inicialmente, e após a definição dos valores finais dos parâmetros geotécnicos que melhor descrevem a camada mais superficial das unidades geológicas, procurou-se identificar as correlações de parâmetros geotécnicos (coesão e ângulo de atrito) mais adequadas ao caso de estudo, com o objectivo de estimar a espessura de solo potencialmente instável. Vários autores como Terzaghi & Peck (1948), Bowles (1997) e Vallejo *et al.*, (2002) apresentam correlações entre estas características geotécnicas dos solos e as características de resistência à compressão. São estas correlações que irão permitir relacionar as características das unidades geológicas da área de estudo com o valor de N_{SPT} para o qual o solo se considera instável. Para os solos granulares utilizou-se a correlação de Vallejo *et al.* (2002), o qual usa valores ligeiramente mais baixos que Bowles (1997), valorizando assim a segurança. Já para os solos coesivos optou-se pela correlação de Bowles (1997). Nas Tabelas 9.1 e 9.2 encontram-se expressos os valores tabelados por cada um dos autores, já com adaptação às medidas adoptadas durante o estudo.

Tabela 9.1: Correlação da compactidade dos solos granulares com os valores de ensaios SPT e o ângulo de atrito interno (Vallejo *et al.*, 2002).

Compactidade	N_{SPT}	Ângulo de Atrito Interno
Muito fofa	0 - 4	28
Fofa	4 - 10	28 - 30
Medianamente densa	10 - 30	30 - 36
Densa	30 - 50	36 - 41
Muito densa	> 50	> 41

Tabela 9.2: Correlação da consistência dos solos argiloso com os valores de ensaio SPT e a coesão dos solos (adaptado de Bowles, 1997).

Consistência	N_{SPT}	Compressão Simples		Coesão
		kN/cm ²	kN/m ²	kN/m ²
Muito mole	2	0,25	24,52	12,26
Mole	2 - 4	1,25 - 0,5	24,52 - 49,03	12,26 - 24,52
Média	4 - 8	0,5 - 1,0	49,03 - 98,07	24,52 - 49,03
Rija	8 - 15	1,0 - 2,0	98,07 - 196,13	49,03 - 98,07
Muito rija	15 - 30	2,0 - 4,0	196,13 - 392,27	98,07 - 196,13
Dura	> 30	4,0 - 8,0	392,27 - 784,53	196,13 - 392,27

Com base nestas correlações obtiveram-se os seguintes valores limite de N_{SPT} para cada unidade geológica, Tabela 9.3, para a estimativa da espessura de solo potencialmente instável.

Tabela 9.3: Valores finais de limite de N_{SPT} , aplicáveis na delimitação da espessura de solo potencialmente instável, obtidos para as formações geológicas após aplicação de correlações empíricas. A cinza claro encontram-se destacadas as formações compostas, maioritariamente, por solos granulares e a cinza mais escuro as formações compostas, maioritariamente, por solos coesivos.

Formações	c' (kN/m ²)	ϕ' (graus)	Limites N_{SPT}
			para a espessura de solo potencialmente instável
M_{Va2}	4	30	10
M_{Va1}	10	34	22
M_{Ivb}	8	32	16
M_{Iva}	8	20	4 - 6
M_{III}	12	36	30
M_{II}	6	30	10
M_I	6	26	4 - 6
a, at	4	24	4 - 6

Para esse fim, procedeu-se à recolha dos limites inferiores de cada formação em cada sondagem. Como factor discriminatório utilizou-se a distribuição da carta geológica. Nas zonas de aterro, Martim Moniz, Restauradores, Esteiro da Baixa e zona ribeirinha, optou-se por considerar apenas a espessura contida nos aterros e aluviões. Descartou-se qualquer unidade geológica que ainda poderia ter sido interceptada na sondagem, uma vez que, nestas zonas planas não existem condições para a ocorrência de movimentos de vertente. Para além disto, na maioria dos casos, as espessuras delimitadas dentro das aluviões/aterros já excede o aceitável passível de ser mobilizado.

Nas zonas onde se distribui o Miocénico, considerou-se a cobertura de aterro, quando esta existe, mais a formação miocénica adjacente. Nestes casos, o limite inferior foi delimitado tendo em conta a formação miocénica presente e resultou da soma da espessura de aterro mais a espessura de miocénico que se encontrava dentro dos limites estabelecidos para cada formação. Como muitos dos aterros presentes nestes locais encontram-se directamente associados às formações miocénicas aflorantes não se considera necessário realizar a distinção entre as duas unidades.

O produto final, Figura 9.1, resulta num mapa com informações do posicionamento do limite inferior de N_{SPT} , medido a partir da boca da sondagem, a qual se localiza à superfície. Este limite inferior pode ser considerado uma espessura de solo potencialmente instável, delimitada entre a superfície e o limite inferior em profundidade.

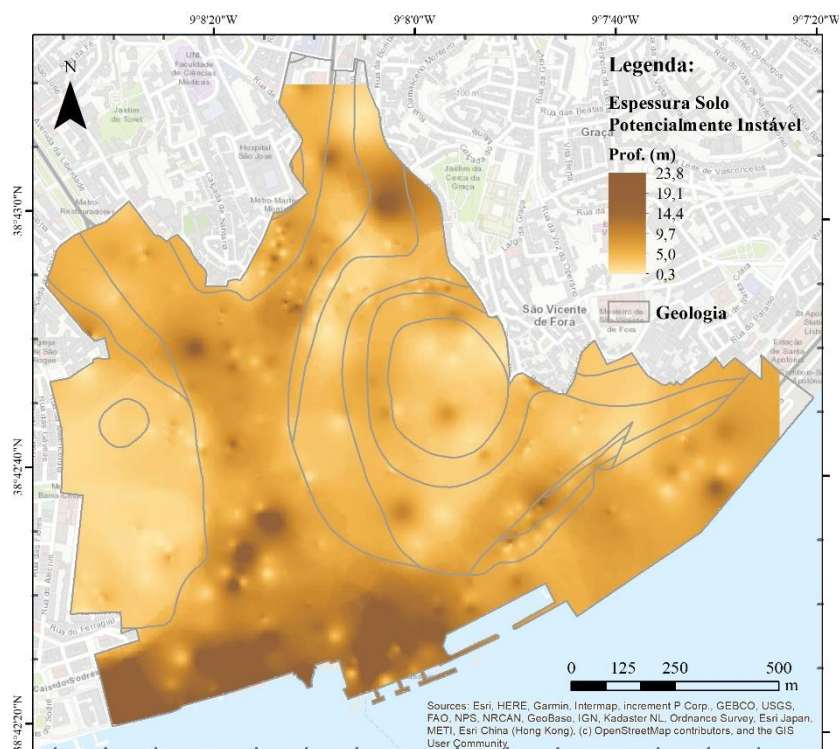


Figura 9.1: Distribuição da espessura de solo potencialmente instável na área de estudo. Destaque para a delimitação dos limites geológicos das formações.

É possível constatar que a espessura de solo potencialmente instável varia entre um limite mínimo de 0,3m e um limite máximo de 23,8m. Os valores mínimos posicionam-se, na sua maioria, sobre as zonas onde afloram formações com maior resistência, as formações miocénicas. Os valores mais altos, localizam-se nas zonas das formações com menor resistência à penetração dinâmica, como os locais onde afloram as aluviões e os aterros. Esta relação é bem visível quando comparada a distribuição destas espessuras com os limites geológicos (Fig.9.1).

No desenvolver dos modelos houve a necessidade de fixar o valor máximo desta espessura a 4m, visto que: o modelo de estabilidade urbano, o do talude infinito, só pode ser aplicador a instabilidade superficial e, imperfeições no MDT de base motivam situações locais de declive superior ao que existe no terreno, conduzindo a resultados finais espúrios.

10. Cálculo da Susceptibilidade

10.1. Variável m (razão entre a espessura de solo saturado e a espessura de solo potencialmente instável)

Para a obtenção da variável de m , aplicou-se o modelo *SHALSTAB* de Montgomery & Dietrich (1994). Os dados foram introduzidos no *software ArcMap*, onde foram trabalhados e relacionados de modo a obter esta variável. De seguida, é apresentada a síntese dos dados utilizados:

- **(q) Precipitação efectiva:** $q=0,1144$ m para 1 dia de duração (Subcapítulo 6.1);
- **(f_i) Factor de infiltração:** com base no uso e ocupação do solo, procedeu-se à caracterização do valor do factor de infiltração (valores de 0 a 1) (Subcapítulo 7.1, Figura 7.2);
- **(h) Espessura de solo potencialmente instável:** parâmetro obtido no Capítulo 9 (Figura 9.1, valores em m). A espessura foi limitada a 4m, valor razoável a ser instabilizado por movimentos superficiais;
- **(k) Conductividade hidráulica:** dados expressos na Tabela 5.4 (valores em m/dia);
- **(T) Transmissividade:** produto entre a h (m) e a k (m/dia) (T em m^2 /dia) (Anexo 17);
- **(a) Área de contribuição:** nível de informação obtido pela utilização da ferramenta *SHALSTAB* compatível com o programa *ArcView* 3.1 (Capítulo 8, Figura 8.1);
- **(b) Dimensão do pixel:** pixel de dimensão 5 por 5m;
- **(σ) Declive:** o mapa do declive, Figura 3.5, foi convertido em radianos e, posteriormente, terão sido realizadas as funções trigonométricas;

Com estes dados, recorreu-se à ferramenta do *Spacial Analyst Tools, Map Algebra, Raster Calculator* e foi resolvida a expressão do modelo *SHALSTAB* de Montgomery & Dietrich (1994) com a adaptação de Vasconcelos (2011) (Exp. 2.6). Obteve-se o mapa da Fig.10.1. Posteriormente, e para efeitos de cálculo do modelo geológico, utilizando o *raster calculator* e limitou-se o valor máximo da variável m a 1,5, de modo a evitar que surgissem valores negativos no cálculo do FS e também porque posições do nível piezométrico situado muito acima da superfície topográfica seriam irrealistas.

Analisando o mapa final, podemos apontar duas zonas com saturações diferentes, uma representada a azul claro e outra a roxo. O tom azul evidencia as zonas onde a saturação do solo é menor e o tom roxo as zonas onde ocorre uma maior saturação dos solos. Estes dois extremos podem ser influenciados pelo uso e ocupação do solo, afectando a quantidade de água que se infiltra no sub-solo, e ainda pela área de contribuição e pelo declive. Notoriamente, há uma correspondência das zonas de maior declive e os valores de saturação mais baixos, distribuídos, generalizadamente, pelas zonas de formações miocénicas. Em contraste, os valores de maior saturação dispõem-se nos declives mais baixos, evidenciando as zonas planas com cobertura aluvionar e de aterros, mas também mais pontualmente, zonas específicas ao longo das duas colinas.

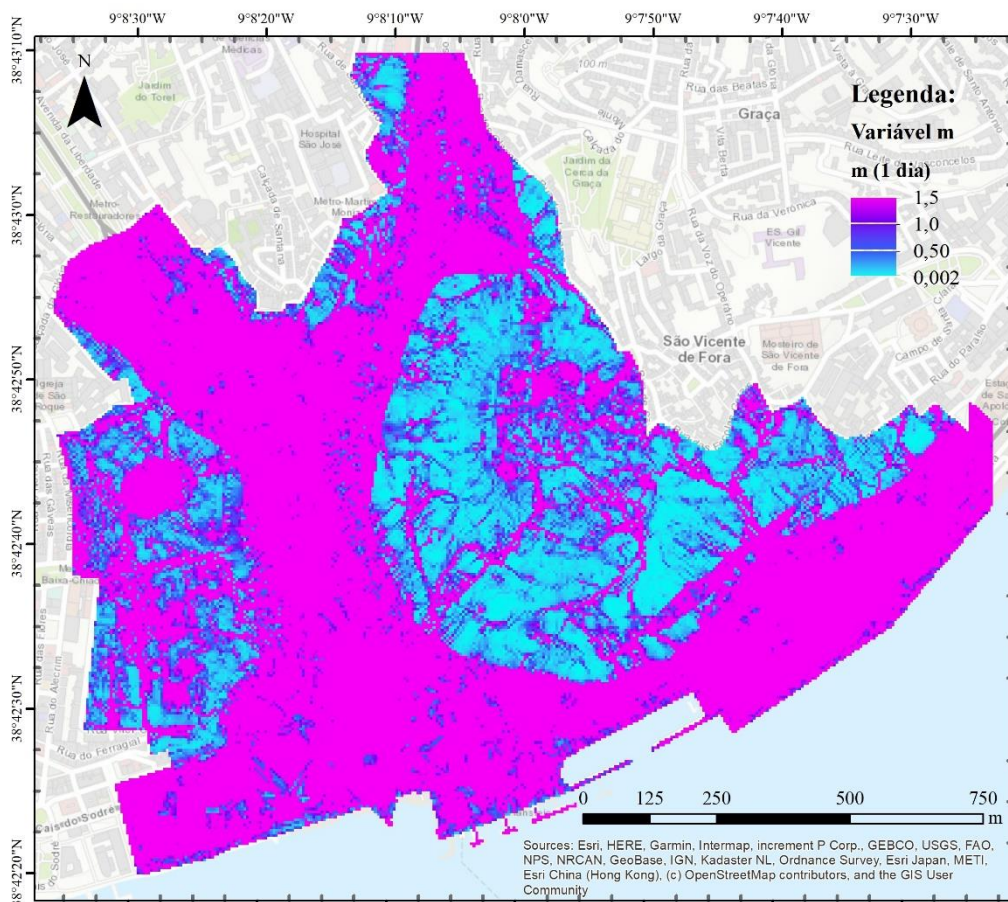


Figura 10.1: Distribuição da cartografia do variável m obtida pela aplicação do modelo hidrológico SHALSTAB, para 1 dia de precipitação e com valor máximo limitado a 1,5m.

10.2. Mapa de Susceptibilidade

O mapa de susceptibilidade foi efectuado com recurso à aplicação do modelo geológico do Talude Infinito de Sharma (2002), o qual gera um mapa com a variação dos valores do FS pela área de estudo. Para a elaboração deste nível de informação adicionaram-se, como descrito anteriormente, as variáveis ao programa *ArcMap*, onde foram relacionadas segundo a expressão do talude infinito e calculado o FS. De seguida será apresentada a síntese dos dados utilizados e as respetivas unidades:

- **(c') Coesão efectiva:** dados obtidos pela análise das variáveis geotécnicas de cada formação geológica em kN/m^2 (Subcapítulo 5.5.2, Tabela 5.3, Anexo 14)
- **(ϕ) Ângulo de Atrito Interno:** dados obtidos pela análise das variáveis geotécnicas de cada formação geológica, utilizados em radianos (Subcapítulo 5.5.2, Tabela 5.3, Anexo 15);
- **(γ , γ_{sub} , γ_{sat}) Peso específico, Peso específico submerso e Peso específico saturado:** dados obtidos pela análise bibliográfica e geotécnica das características dos solos de cada formação geológica em kN/m^3 (Subcapítulo 5.5.1, Tabela 5.2, Anexos 11, 12 e 13);
- **(h) Espessura de solo potencialmente instável:** mapa obtido por correlações dos parâmetros geotécnicos e valores de N_{SPT} , em metros (Capítulo 9, Figura 9.1).
- **(β) Declive:** o mapa do declive em radianos ao qual foram aplicadas funções trigonométricas, Figura 3.5;
- **(m):** variável obtida pela aplicação do modelo hidrogeológico *SHALSTAB*, Figura 10.3.

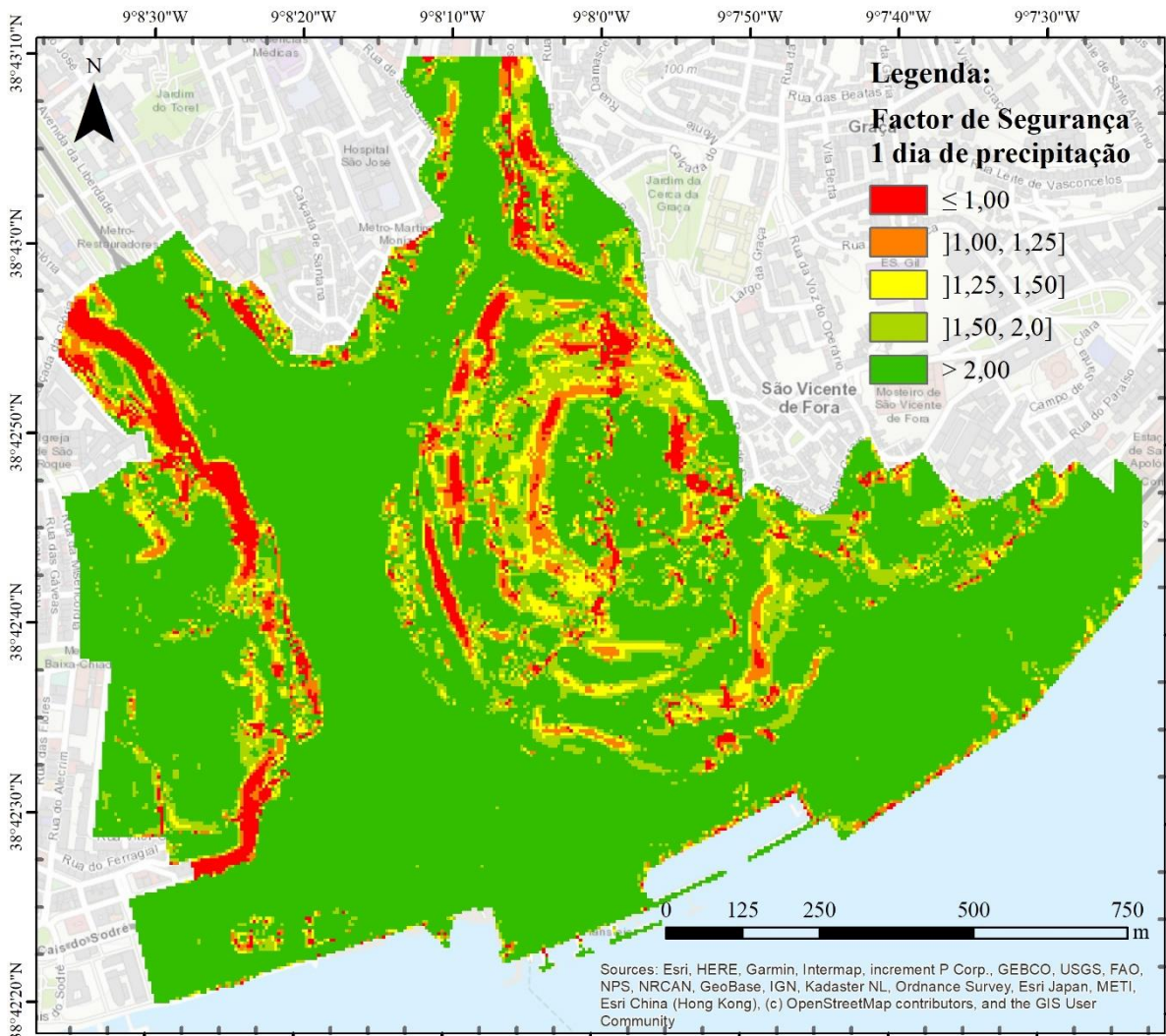


Figura 10.2: Cartografia do factor de segurança, para um cenário de 1 dia de precipitação acumulada, por meio da aplicação do modelo geológico do Talude Infinito de Sharma (2002).

Tendo os dados todos discriminados e mapeados, recorreu-se ao software *ArcMap* e à ferramenta do *Spacial Analyst Tools*, *Map Algebra*, ***Raster Calculator*** onde foi realizada a expressão do modelo do Talude Infinito (Exp. 2.3). Como resultado final, obteve-se o mapa da distribuição do factor de segurança na área de estudo, valores que foram agrupados em classes, tendo em conta a Tabela 10.1. Na Figura 10.2 encontra-se representado o mapa com a distribuição do facto de segurança para a área de estudo.

Tabela 10.1: Classificação das classes de susceptibilidade tendo em conta o valor do factor de segurança associado.

Factor de Segurança	Classe de Susceptibilidade
≤ 1,00	Muito Elevada
]1,00, 1,25]	Elevada
]1,25, 1,50]	Moderada
]1,50, 2,00]	Baixa
> 2,00	Muito Baixa

10.3. Validação do Modelo

Após obtido o FS, através da aplicação do modelo Geológico do Talude Infinito de Sharma (2002), é crucial proceder à validação dos resultados produzidos pelo modelo. Para este processo de validação recorre-se a inventários e utiliza-se a curva ROC (Receiver Operating Characteristic) e a AAC (área abaixo da curva). A validação irá permitir identificar a qualidade do modelo produzido para a previsão dos movimentos de massa em vertentes na área de estudo.

10.3.1. Inventário

Para que a validação seja feita é necessário recorrer a inventários de movimentos, onde exista um registo e catalogação deste tipo de ocorrências. Um inventário é uma forma simples de cartografar os movimentos ocorridos no passado, podendo ser produzidos através de diversas técnicas consoante o seu objectivo, dimensão da área de estudo, escala e dos recursos disponíveis para cada trabalho (Vasconcelos, 2011).

Guzzetti (2005) e Vasconcelos (2011) nas suas teses identificam alguns pressupostos que permitem a criação de inventários, de entre os quais se destacam:

- A ocorrência de movimentos deixa vestígios topográficos na superfície, que representam características geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas, de uso e ocupação do solo e relativas ao clima da região. Se estes vestígios persistirem é possível identificar, mapear os locais e construir um inventário de movimentos de vertentes;
- As evidências no terreno da ocorrência de movimento dependem do tipo de movimento que ocorre e da sua taxa de movimentação;
- A ocorrência de instabilidade surge da conjugação de factores inerentes aos materiais e dos processos físicos a eles associados, podendo ser passíveis de determinação de forma empírica, por meios determinístico ou estatístico;
- Os movimentos de vertente apresentam maior probabilidade de ocorrerem quando as condições que os originaram no passado se encontrem novamente presentes.

Posto isto, os dados referentes a movimentos podem ser recolhidos de diferentes fontes como da literatura, relatórios científicos, inquéritos, registos históricos, da análise de fotografias aéreas e trabalho de campo, entre outros (Vasconcelos, 2011). Dependente do tipo de informação que são compostos, da sua fonte e da sua escala surgem vários tipos de inventários diferentes.

10.3.1.1. Inventários de Movimentos e de Campo

Para este trabalho foram elaborados dois inventários diferentes, um que considera movimentos ocorridos no passado e outro que considera as evidências detectadas pelo trabalho de campo.

O primeiro inventário é composto pelos movimentos confirmados, ocorridos dentro dos limites da freguesia. Os seus dados foram recolhidos de inventários da CML e de dados bibliográficos (inventários de Vaz (2010) e Vasconcelos (2011)). Este inventário é composto por apenas 4 movimentos confirmados. Isto não invalida a existência de outros, aliás são descritos vários outros acontecimentos por Vaz (2010) e outros quantos em documentos históricos. No entanto, a maioria dos acontecimentos descritos não apresentam localizações concretas ou evidências actuais da sua ocorrência, devido à grande alteração que a freguesia tem sofrido ao longo dos anos. Ademais, o facto de o trabalho incidir apenas sobre uma freguesia, limita bastante os acontecimentos registados na actualidade.

O segundo inventário compreende as zonas instáveis identificadas durante a campanha de campo, detectadas pelas patologias presentes no edificado. Para este inventário procedeu-se a uma selecção da informação, considerando os edifícios descritos com indícios que permitam inferir, com alguma certeza, a existência de processos de deformação do substrato. Numa primeira observação, excluiu-se os edifícios que apresentavam patologias graves devido à degradação e falta de manutenção da estrutura. De seguida, verificou-se quais os edifícios que, mesmo apresentando um bom e médio estado de conservação, apresentavam patologias mais graves (compreendidas nas classes III e II da classificação de campo).

Na Figura 10.3 encontram-se representados os dois inventários elaborados no decorrer deste trabalho.

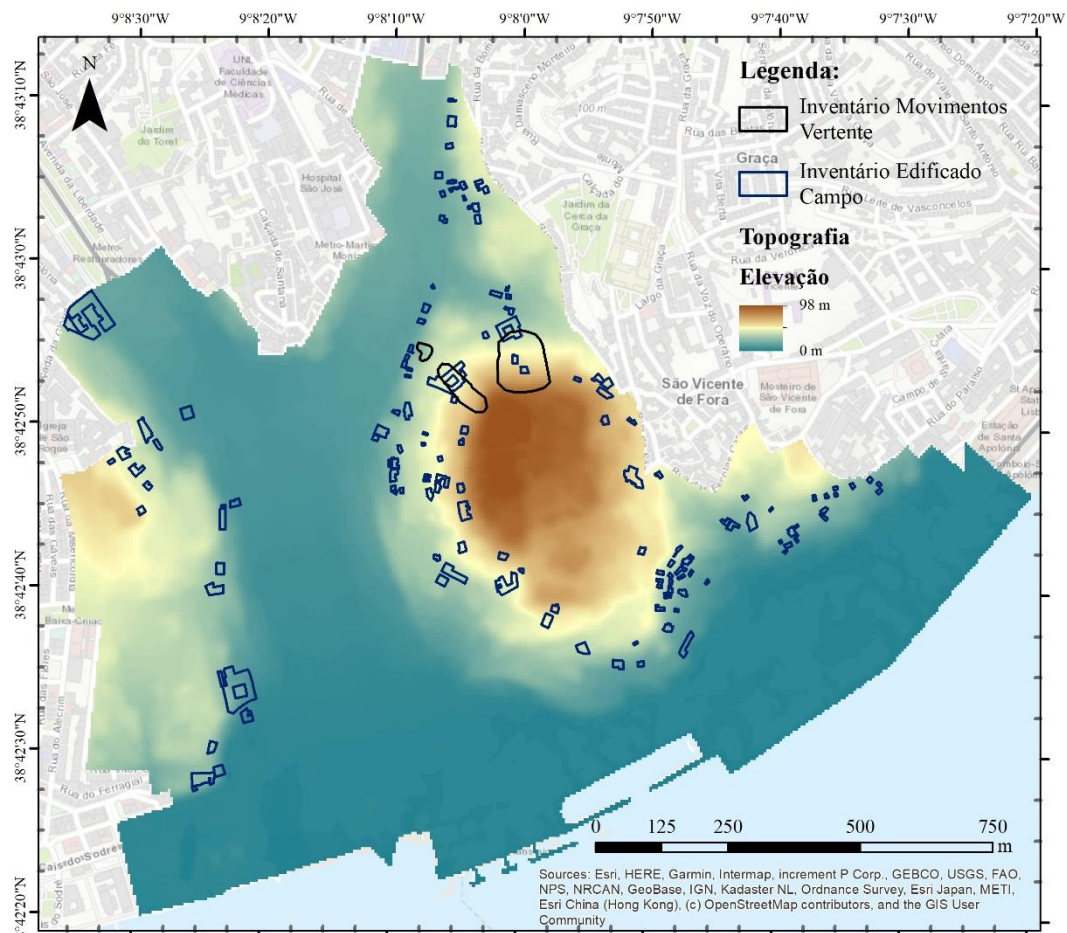


Figura 10.3: Localização dos inventários de movimentos e de campo, a preto destaque para o inventário de movimentos ocorridos e a azul escuro o inventário realizado com base nos indícios no edificado.

10.3.2. Curva ROC e AAC

Para a validação do modelo recorreu-se aos dois inventários realizados e procedeu-se a uma análise com a curva ROC. Esta análise permite verificar o desempenho do modelo de previsão de movimentos, através de uma abordagem estatística com método gráfico simples (Braga, 2000; Vasconcelos, 2011; Sobral, 2018).

As curvas ROC correspondem a uma representação gráfica dos pares de sensibilidade, ou fracção de verdadeiros positivos (FVP) (nas ordenadas) e especificidade, ou fracção de falso positivos (FFP) (nas abcissas) (Braga, 2000; Vasconcelos, 2011). No gráfico, segundo Vasconcelos (2011), a FVP

corresponde às áreas que no modelo aparecem identificadas como instáveis e que se confirmam realmente estarem instáveis. Em contraste, a FFP vai corresponder às áreas definidas como instáveis, mas que na verdade se verificam estarem estáveis, por comparação com o inventário.

Segundo Vasconcelos (2011), nas curvas onde são atingidas elevadas percentagens da FVP associadas a pequenas percentagens de FFP, os modelos preditivos são considerados mais fiáveis. Por sua vez, os modelos que possuem elevadas percentagens de FVP e de FFP são considerados menos fiáveis. Isto significa que, embora os modelos apresentem a mesma AAC, a curva ROC com maior declive representará o modelo mais rigoroso.

Após a construção da curva ROC de validação, é possível calcular a AAC, que permite avaliar a qualidade de previsão global do modelo (Bi & Bennett, 2003; Vasconcelos, 2011; Sobral, 2018). Para este fim, utiliza-se a Expressão 10.1, onde $(L_{si} - L_i)$ corresponde à amplitude da classe produzida, a_i ao valor da ordenada correspondente a L_i e b_i ao valor da ordenada correspondente a L_{si} :

$$AAC = \sum_{i=1}^n \left[(L_{si} - L_i) \times \left(\frac{a_i + b_i}{2} \right) \right] \quad [10.1]$$

Guzzetti (2005) descreve que, para o modelo poder ser considerado correcto terá de conter pelo menos 0,7 de AAC. Tendo isto em conta, modelos com AAC que tomem valores entre 0,80 e 0,90 são considerados aceitáveis e bons e modelos com AAC superior a 0,90 são considerados excelentes.

Como última nota Vasconcelos (2011) realça que o zonamento de áreas susceptíveis à ocorrência de movimentos de massa em vertente não é uma ciência exacta, sendo que os resultados consistem em previsões do comportamento das vertentes baseada num conjunto de informação que se dispõem na altura do estudo.

10.3.3. Validação do Modelo

Nas Figuras 10.4 encontram-se representadas as curvas ROC de cada um dos inventários realizados, o de movimentos ocorridos, indícios no edificado e a junção de ambos.

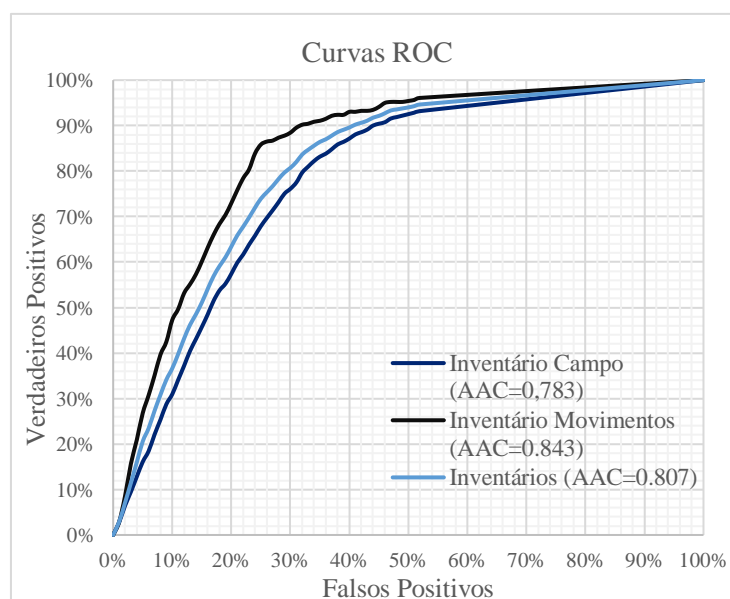


Figura 10.4: Curva ROC de predição para a avaliação dos resultados do modelo de susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa em vertentes para cenário de 1 dia de precipitação acumulada, utilizando o inventário de movimentos ocorridos. Destaque para o valor de AAC.

O processo de validação iniciou-se pela reclassificação dos valores de FS em classes, no maior número possível com base no quantil, que terão sido comparadas com os movimentos destacados em cada inventário. Disto resulta um ficheiro com a indicação do número de pixéis de movimentos detectados em cada classe de FS, dados com os quais se procede à elaboração da curva ROC e, posteriormente, ao cálculo da AAC para cada modelo.

Segundo a classificação de Guzzetti (2005), as AAC obtidas permitem classificar os modelos dentro do aceitável a bom. A curva que apresenta melhor ajuste, entre a área do modelo e a área ocupada pelo inventário, é a que apresenta AAC de 0,843, referente ao inventário de movimentos ocorridos (Fig. 10.4, linha preta). Neste, 11% da área do modelo justifica 50% da área do inventário, 19% da área do modelo justifica 70% da área do inventário e 25% da área do modelo justifica 85% da área do inventário.

Para a curva com AAC de 0,783, referente ao inventário de campo, há uma perda de qualidade acompanhada de uma maior necessidade na quantidade de áreas do modelo para justificar a área do inventário. Para esta curva (Fig. 10.4, linha azul escura) já é necessário 16% da área do modelo para justificar 50% dos dados do inventário, 26% e 37% da área do modelo para justificar 70% e 85% da área do inventário, respectivamente. Este facto deve-se a uma distribuição mais irregular do edificado de campo relativo aos inventários de movimentos, o que incrementa a necessidade de uma maior área do modelo para justificar esses locais.

Por último, foi realizada uma curva ROC com a junção dos dois inventários realizados (Fig. 10.4, linha azul clara). Desta resultou uma AAC de 0,807, onde 14% da área do modelo justifica 50% da área do inventário. Por sua vez, 23 e 34% da área do modelo justificam, respectivamente, 70 e 80% da área do inventário.

Tendo em conta o descrito, podemos concluir que o modelo desenvolvido está incluído, segundo a classificação de Guzzetti (2005), nos modelos de qualidade aceitável a boa.

11. Cartografia de Susceptibilidade Final

Após a construção do modelo hidrológico, geológico, dos inventários e da validação do modelo de susceptibilidade, obteve-se como cartografia de susceptibilidade final o mapa da Figura 11.1. A área ocupada por cada classe de susceptibilidade ao longo da área de estudo encontra-se discriminada na Tabela 11.1.

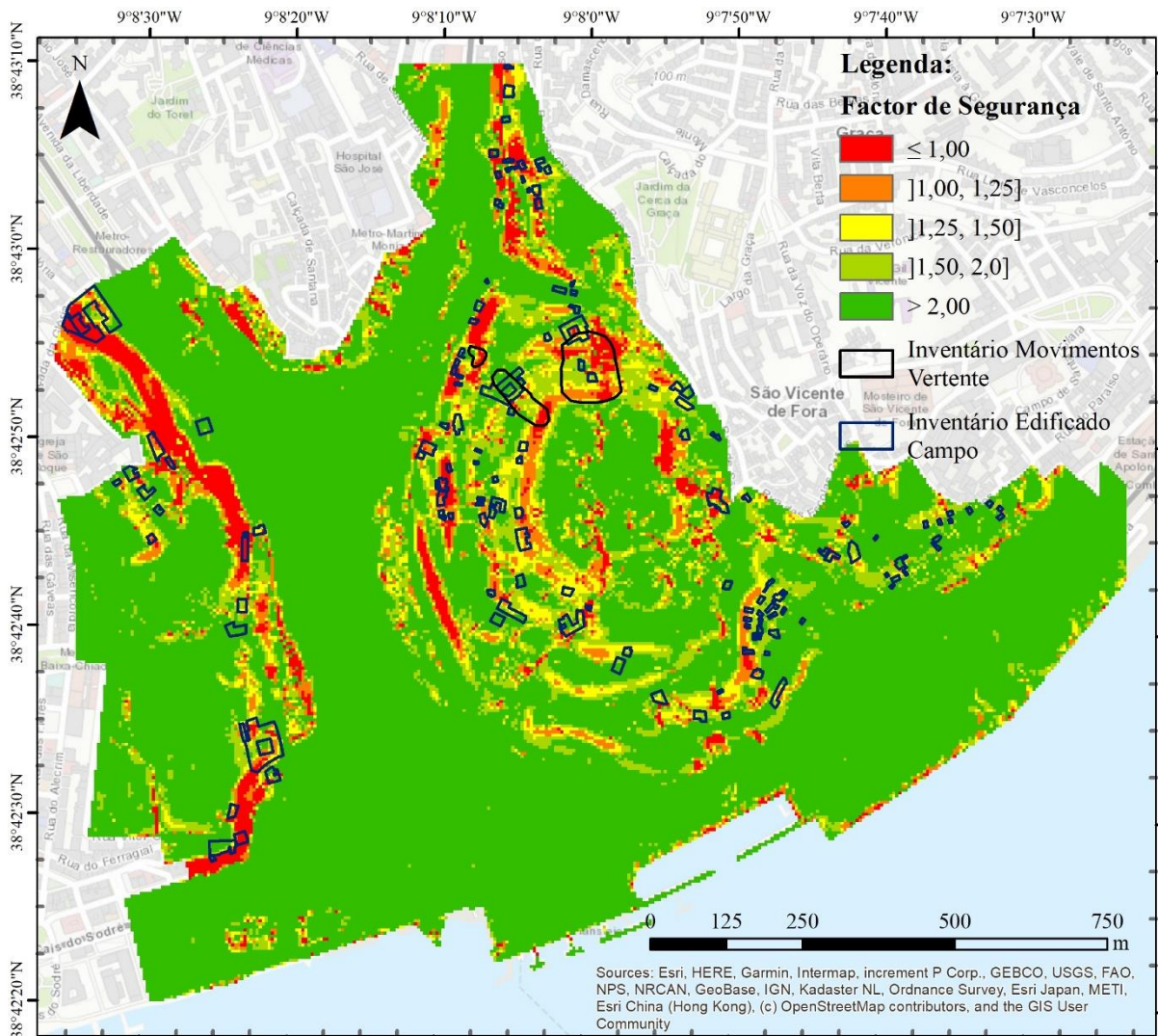


Figura 11.1: Cartografia de susceptibilidade final da ocorrência de movimentos de massa em vertentes, para o cenário de 1 dia de precipitação acumulada. Os valores de factor de segurança podem ser agrupados em classes de susceptibilidade, onde a vermelho está representada a classe muito alta, a laranja a classe alta, a amarelo a moderada, a verde claro a baixa e, por fim, a verde escuro a classe de susceptibilidade muito baixa.

Tabela 11.1: Área que cada classe de susceptibilidade / factor de segurança ocupa na área de estudo.

Susceptibilidade	FS	Nº pixéis	Área (%)	Área (km2)
Muito Alta	<1,00	2799	5%	0,070
Alta	]1,00, 1,25]	2975	5%	0,074
Moderada	]1,25, 1,50]	3485	6%	0,087
Baixa	]1,50, 2,00]	6570	11%	0,164
Muito Baixa	≥ 2,00	42800	73%	1,07
Total		58629	100%	1,466

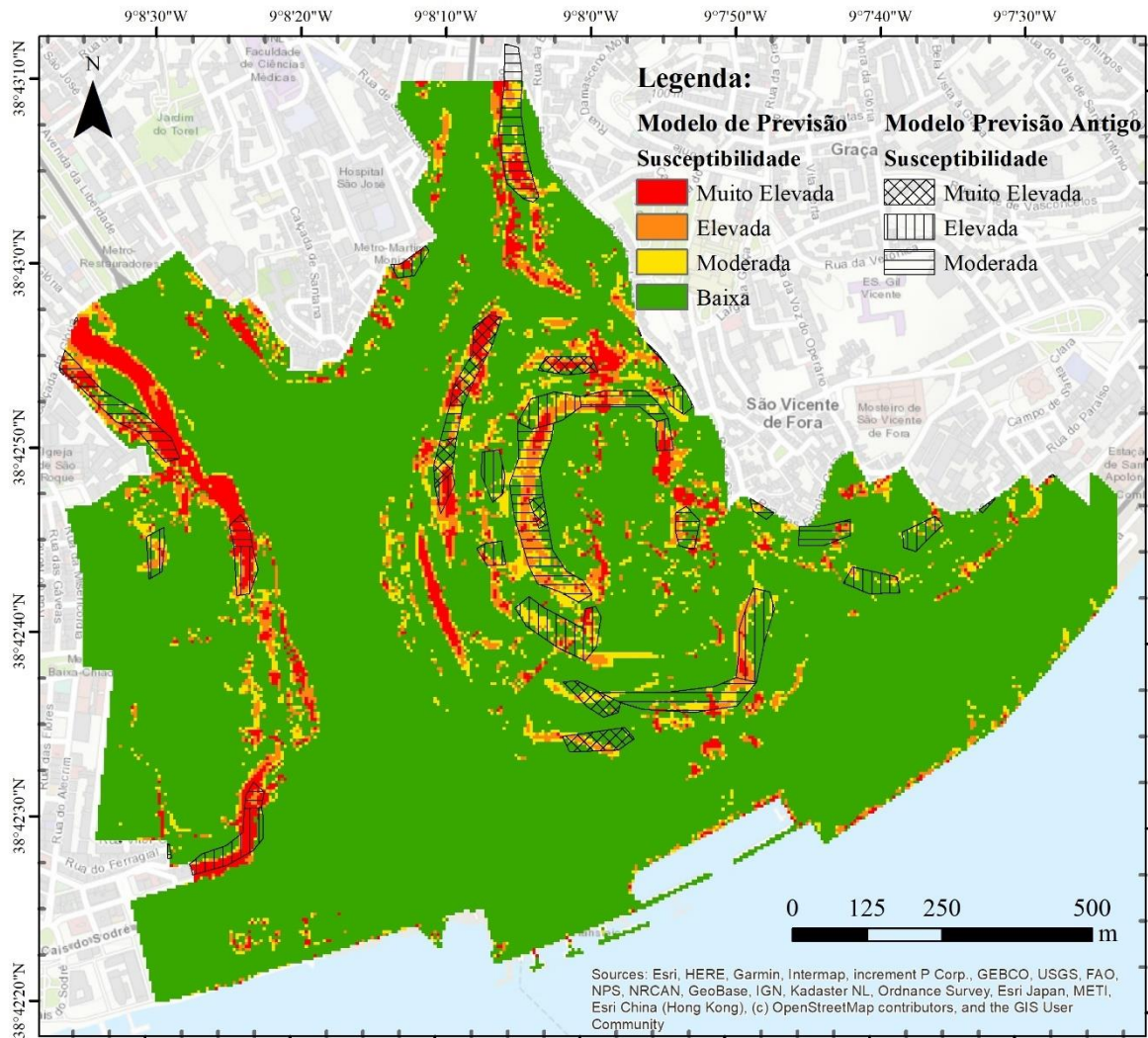


Figura 11.2: Mapa com comparação da cartografia de susceptibilidade obtida pelo modelo aplicado e a cartografia pré-existente da CML.

Tendo obtido o modelo final procedeu-se a uma comparação visual da nova cartografia de susceptibilidade com a antiga da CML (Fig. 11.2). É possível constatar que as novas zonas susceptíveis encontram-se nas imediações das zonas identificadas pelo modelo da CML. No entanto, o modelo aplicado prevê novas áreas e o prolongamento de outras anteriormente identificadas. Com isto, é possível concluir que ocorreu um melhoramento da cartografia de susceptibilidade existente, podendo esta informação trazer um contributo importante para a mitigação do risco associado a movimentos de massa em vertentes na freguesia.

12. Índícios de Deformação

Tendo o mapa de susceptibilidade realizado é possível comparar os indícios detectados na campanha de campo com os locais considerados susceptíveis à ocorrência de movimentos de massa em vertente. Para facilitar esta comparação observou-se três partes da freguesia separadamente.

Na Figura 12.1, encontra-se representado o extremo Oeste da freguesia, a colina de São Roque. Nesta zona, foi identificada uma faixa circundante com valores de FS baixos compreendidos nas classes de susceptibilidade muito elevada a moderada, onde foram observados alguns edifícios durante a campanha de campo. Excluindo a classe IV, edifícios sem patologias estruturais, é possível constatar que existe uma incidência considerável de patologias nos edifícios representados. As patologias mais abundantes são as fissuras (a amarelo, Classe I), e mais pontualmente, destacam edifícios com patologias mais graves, de Classe II e III (a laranja e vermelho, compreendendo as fendas, fendas com desaprumos da fachada, assentamentos, desnivelamentos, etc...). Mesmo considerando, que é possível que alguns edifícios detenham patologias associadas à sua má construção e conservação, podemos afirmar que existe uma certa semelhança no padrão de distribuição das patologias relativamente às classes de susceptibilidade.

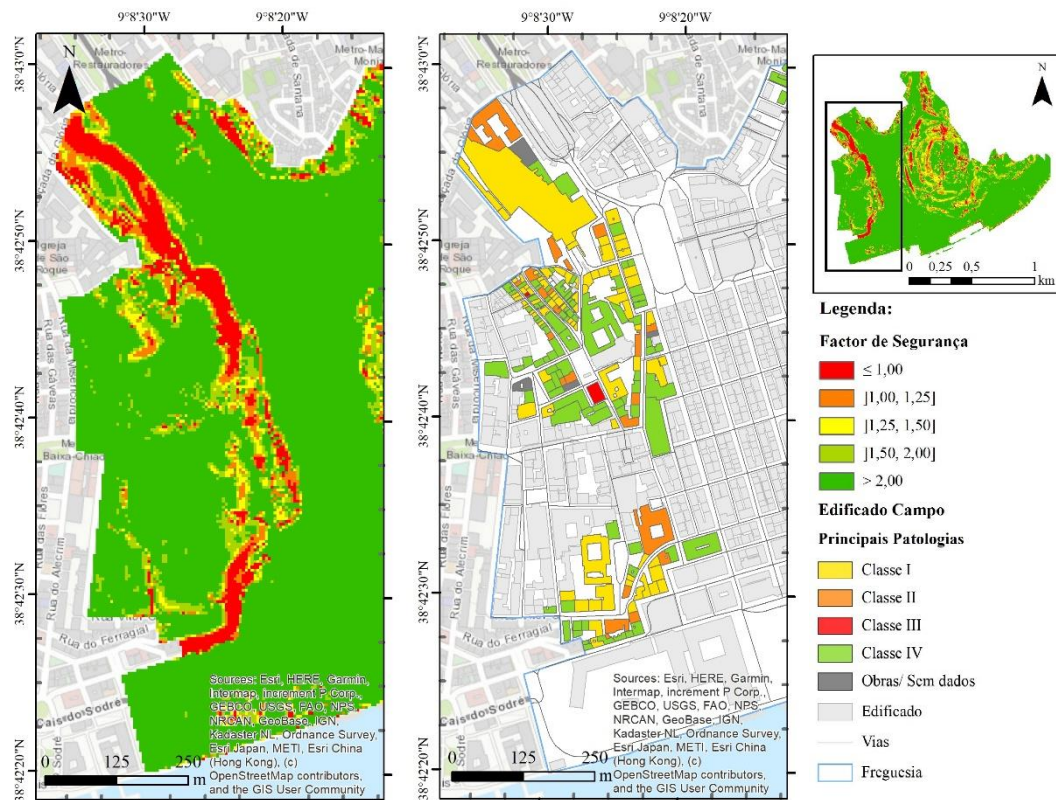


Figura 12.1: Mapas com a distribuição do factor de segurança e patologias estruturais identificadas durante a campanha de campo nos edifícios, na área Oeste da freguesia, Colina de São Roque.

Na Figura 12.2 encontra-se representado o lado mais a Norte e a Oeste da Colina do Castelo. Na zona representada encontram-se várias zonas/ faixas de terreno com valores de FS baixos, o que não é surpreendente devido as características geomorfológicas e geológicas do local. Observando paralelamente os edifícios descritos, verifica-se que existe uma certa associação entre o padrão de susceptibilidade e os edifícios com indícios de patologias, principalmente das patologias de Classe II e III, embora sejam situações mais pontuais. As zonas onde a Classe III não tem representação, por exemplo a SE do mapa da Figura 12.2, permite evidenciar a ausência de FS muito baixos (≤ 1).

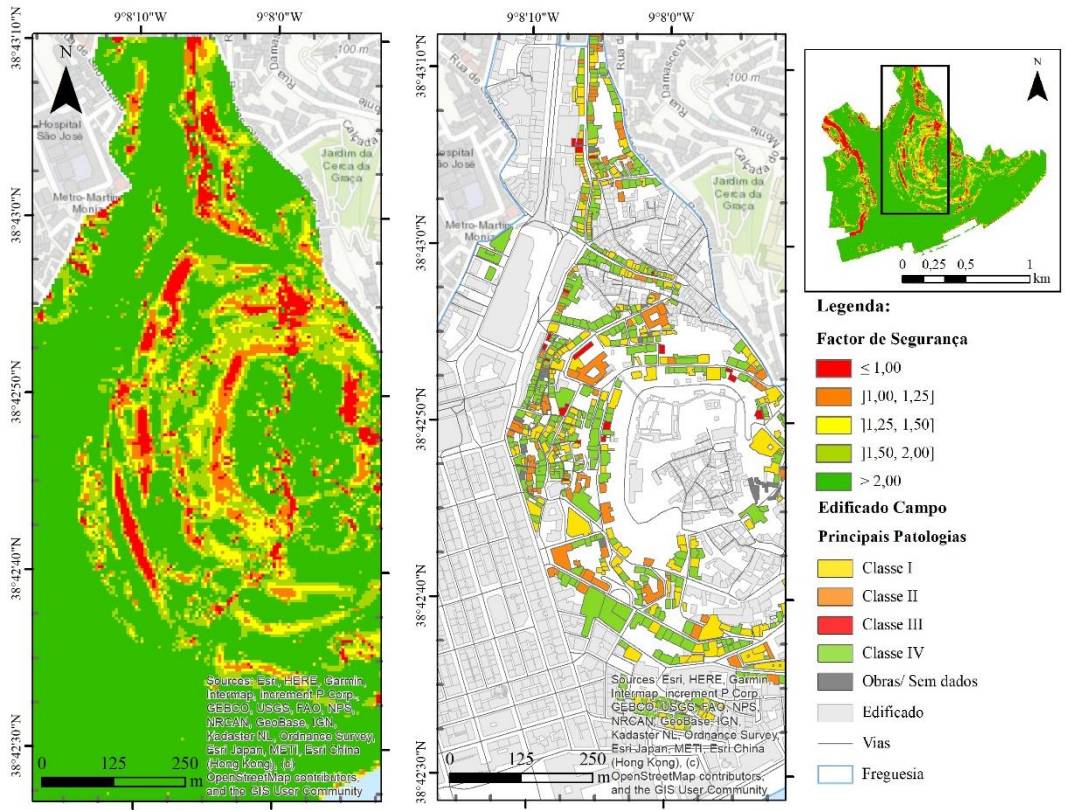


Figura 12.2: Mapas com a distribuição do factor de segurança e patologias estruturais identificadas no edificado observado na campanha de campo, para a zona norte e a oeste da colina do Castelo.

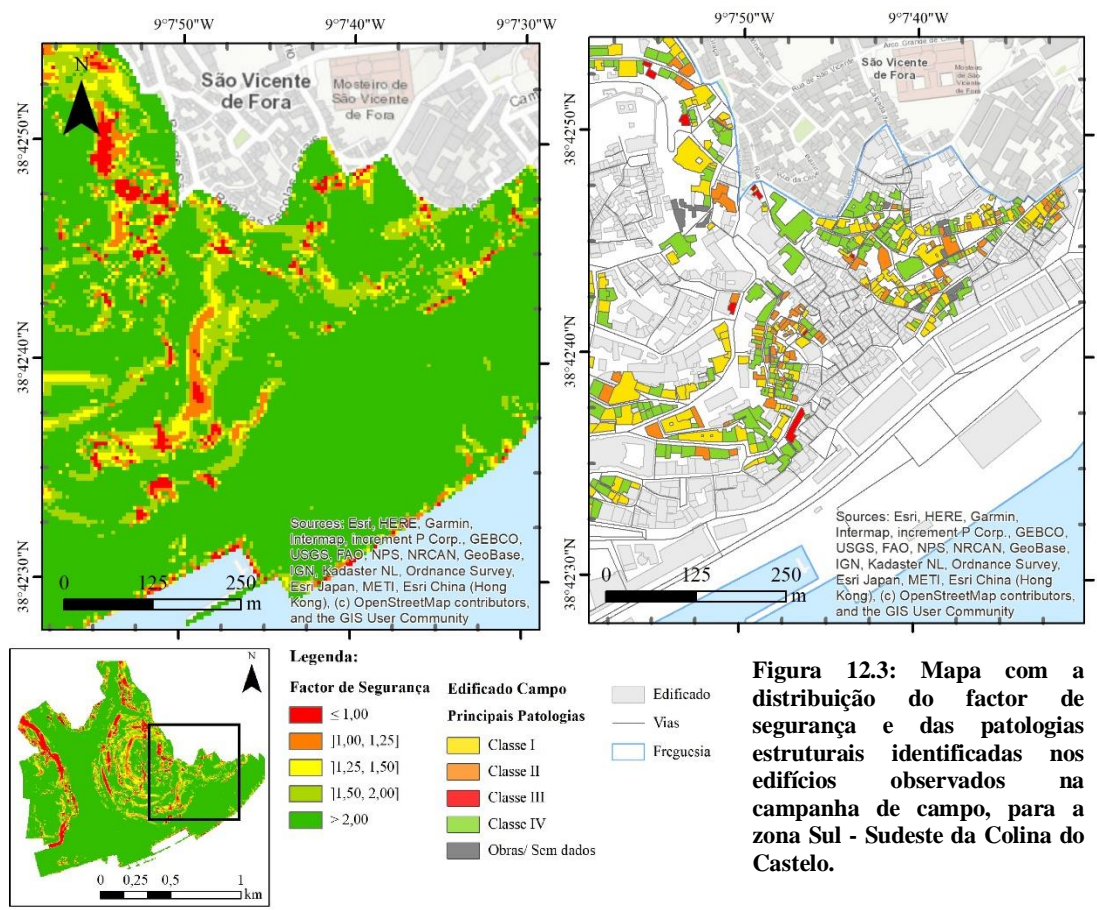


Figura 12.3: Mapa com a distribuição do factor de segurança e das patologias estruturais identificadas nos edifícios observados na campanha de campo, para a zona Sul - Sudeste da Colina do Castelo.

Na Figura 12.3 está representada a área a Sul e a Sudeste da Colina do Castelo. Neste local existe uma menor incidência de zona susceptíveis, comparativamente às restantes observadas anteriormente. No entanto, encontram-se alguns locais onde a susceptibilidade é elevada a moderada, podendo destacar-se também nestes locais ou próximos deles, edifícios onde foram identificadas patologias. Muitos dos edifícios compreendidos na classe III, consideradas patologias mais graves, encontram-se sobre ou nas imediações das zonas de FS menor que 1.25, susceptibilidade muito alta a alta. Já os edifícios com patologias da classe II e I apresentam uma distribuição mais abrangente. Isto torna a associação das características do edificado e da susceptibilidade menos evidente, ainda que não possa ser descartada.

Na Tabela 12.1, é possível constatar a relação entre o valor de FS e a classe de patologias estruturais descritas nos edificados. As classes de susceptibilidade com valores de FS mais baixos são as que apresentam uma maior incidência de edifícios com patologia (mais de 50% dos dados), e menor número de edifícios sem patologias. Conforme se dá o aumento do FS ocorre uma diminuição progressiva da representação de edifícios com patologias e um aumento dos edifícios sem patologias, até que esta classe passa a ser dominante, contendo agora mais de 50% dos dados. Estas observações encontram-se em concordância com o que seria expectável, havendo uma certa correspondência entre a densidade das patologias identificadas em cada local e a classe de susceptibilidade do mesmo.

Tabela 12.1: Correlação entre os valores de factor de segurança, classe de susceptibilidade e as classes de patologias incidentes no edificado detectadas durante a campanha de campo.

Factor Segurança	< 1,00	]1,00, 1,25]	]1,25, 1,50]	]1,50, 2,00]	≥ 2,00
Susceptibilidade	Muito Elevada	Elevada	Moderada	Baixa	Muito Baixa
Patologias					
Classe I	51%	37%	33%	37%	35%
Classe II	18%	19%	18%	16%	12%
Classe III	0%	2%	2%	2%	2%
Total Ed. c/ Patologias	= 69%	= 58%	= 53%	= 55%	= 49%
Classe IV	31%	43%	47%	45%	51%
Total	100%	100%	100%	100%	100%

Observando a incidência de cada classe de patologias, verifica-se que a classe I é sempre dominante em todos os FS, o que retrata a grande representação desta classe por toda a área de estudo. Este facto, faz com que as restantes classes, com muito menor representação, apresentem uma menor expressão. Ainda assim, a classe II, apresenta valores mais elevados para FS mais baixo, os quais diminuem com o aumento do FS. Já a classe III, não se pode considerar que tenha expressão significativa devido aos seus valores serem residuais, refletindo a sua baixa representação geral.

Após estas comparações visuais e numéricas podemos concluir que, existe uma certa associação entre as patologias identificadas e as áreas instáveis. O facto de os FS mais baixos, susceptibilidade mais alta, conterem sempre mais de 50% das patologias é um indicador que poderá existir uma associação, ainda que não haja a possibilidade de associar um tipo de patologia específico a cada classe de FS. O facto de os edifícios sem patologias também aumentarem conforme se dá a o aumento do FS, também pode ser um indicador favorável.

Após estas observações, torna-se importante salientar que os dados recolhidos pelo trabalho de campo não cobrem todas as áreas identificadas com susceptibilidade mais elevadas pelo modelo, uma vez que delimitação das áreas de interesse foi feita com base num modelo pré-existente. Ainda assim, pode considerar-se que existe uma boa amostra da área mapeada relativamente à área obtida. Para

melhores evidências e conclusões teria sido importante uma descrição mais abrangente do edificado, contemplando fachadas tardoz e caixas de escada, para além de relatos que indicassem problemas específicos que pudessem ser associados a deformações nos solos. Com esta informação de certo que a correlação dos dados teria sido mais eficiente e conclusiva.

13. Medidas de Mitigação

Mitigação pode ser descrita como a diminuição dos efeitos que um evento perigoso pode originar. Por outras palavras, a mitigação consiste no resultado desejado da aplicação de medidas de redução de risco (Glade *et al.*, 2005). Um dos objectivos finais deste trabalho é a apresentação de algumas medidas de mitigação que possam ser aplicáveis à área de estudo.

A partir dos dados obtidos até ao momento, é possível individualizar algumas áreas com maior susceptibilidade, isto é, onde existe a possibilidade da ocorrência destes movimentos, tendo em conta as condições do terreno, e apresentar algumas medidas gerais que se adequem a ambos os contextos.

É conhecido que as alterações antropogénicas nos ambientes naturais, conjuntamente com as alterações climáticas e eventos sísmicos, são dos factores que mais contribuem para o desencadeamento de movimentos de vertentes. Isto torna os ambientes urbanos particularmente vulneráveis, especialmente devido à enorme pressão demográfica, que tende a aumentar, paralelamente ao aumento do uso do solo (Di Martine *et al.*, 2012). Esta é uma realidade que afecta a cidade de Lisboa e esta pequena área de estudo. Temos uma área com um contexto urbano denso, com poucos espaços naturais/verdes, onde os declives elevados e as características geológicas originam várias zonas susceptíveis à ocorrência de movimentos de massa em vertente. Por estas razões, torna-se essencial perceber as zonas com potencialidade de sofrerem movimentos e tentar mitigar as consequências destes possíveis eventos.

Para mitigar o risco de ocorrências de movimentos de massa em vertente é essencial identificar zonas susceptíveis, os elementos expostos ao risco e avaliar a estabilidade do local. Para tal, é importante que haja o reconhecimento da instabilidade por meio de evidência detectadas nos terrenos, nos edifícios e/ou por campanhas de monitorização. Só assim poderia haver uma identificação completa da instabilidade e das suas características e, assim, proceder à aplicação de medidas de estabilização e/ou correção de vertentes adequadas a cada caso específico.

Numa primeira abordagem, o método mais simples, recai sobre a correção da instabilidade por meio de aplicação de métodos de estabilização dos solos, onde através de alterações de origem química, física ou biológica, se promove alterações das propriedades *in situ* do solo e o seu reforço interno (Gorski, 2010). Alguns destes processos recaem sobre a aplicação de vegetação, tratamento de solos, reforço interno, implementação de sistemas de drenagens, superficiais ou subterrâneos, ou por alterações da geometria do talude. Estes são métodos mais simples, menos dispendiosos e bastante eficientes na estabilização de massas de solo instável.

A utilização de vegetação é um método biológico, bastante simples, eficientes e vantajoso para o controlo da instabilidade (Abramson *et al.*, 2002), sendo denominado por Bioengenharia (Mulyono *et al.*, (2018)). Em declives expostos, a implementação de vegetação pode promover a estabilização por meio das raízes que melhoram a agregação das partículas do solo, auxiliam na sustentação para aumentar a sua resistência ao corte e aumentando a coesão do solo. As ramificações que penetram no solo, vão por sua vez, criar uma malha que agregará todas as partículas. A folhagem intersecta a chuva, diminuindo o escoamento superficial e a sua velocidade, e por consequência a erosão do solo. Para além disto, a folhagem diminui também a infiltração de água no solo e promove o processo natural de

evapotranspiração que permite a regulação da mesma, inibindo a saturação. Mulyono *et al.*, (2018) apresentam no seu trabalho algumas espécies que podem contribuir para a estabilização de declives e algumas técnicas que podem ser utilizadas para o mesmo efeito.

Outras opções, ainda consideradas relativamente simples, são processos de estabilização de solos por aplicação de métodos físicos e químicos, nos quais ocorrem alterações nas zonas instáveis por meio de (Gorski, 2010): processos de compactação de solos, com diminuição da porosidade; substituição de solos, à superfície com a substituição de uma camada de solo de má qualidade e, em profundidade, com a execução de estacas de areia ou brita; Cimentação e estabilização, aplicados para selar solos de fundação, melhorar fundações ou sub-bases de pavimentos.

Quando a instabilidade pode ser combatida por meio da redução da água do sistema, pode optar-se pela implementação de estruturas de drenagem, as quais não exigem uma grande alteração do declive. Estas estruturas devem ser adequadas as características geológicas e hidrogeológicas do solo, sendo fundamental conhecer o local e a profundidade da superfície de ruptura e a localização e variação do nível de água no solo. Estas estruturas podem ser superficiais ou subterrâneas, sendo que as superficiais têm como objectivo a captação e desvio de água superficial, a diminuição da infiltração e da erosão do solo. Já os sistemas subterrâneos utilizam-se quando a superfície de ruptura se localiza abaixo do nível freático (Abramson *et al.*, 2002) e têm como objectivo a extração da água do solo, permitindo sobretudo a regulação do nível freático e da pressão da água.

As medidas de alteração geométrica do talude, permitem a alteração da inclinação do declive, do seu pendor, alteração da distribuição de pesos ou reforços no sopé. É comum optar-se por métodos de remoção de peso no topo da vertente, adição de material na base, criação de declives achatados ou de declives em patamar (Abramson *et al.*, 2002). Estes normalmente são métodos eficientes e económicos quando acompanhados com sistemas de drenagem adequados.

Quando as medidas descritas não constituem métodos eficientes para a estabilização do declive surge a necessidade de utilizar medidas estruturais que promovam o suporte ou contenção dos declives. Estas estruturas podem ser muito diversas e oferecem resistência ao movimento, promovendo a estabilidade contra a rotura e evitando deslocamentos de massa (Barros *et al.*, 2015). As estruturas de suporte podem ser, por exemplos, muros de gravidade, muros consola, paredes ancoradas e contrafortes. As estruturas de contenção, utilizam-se quando um corte ou preenchimento é necessário e não existe espaço suficiente disponível (Abramson *et al.*, 2002). Estas podem ser muros do tipo Berlim ou Munique e paredes moldadas, por exemplo. Para além destas estruturas, é comum que seja necessário um reforço por meio da instalação de estruturas auxiliares de suporte (Brito, 2017). Estas apresentam uma aplicação comum em meio urbano, quando se requer um travamento horizontal, devido à altura dos declives, mas também, devido à redução dos deslocamentos horizontais, os quais devem ser meticulosamente controlados. Algumas destas estruturas auxiliares de suporte são as pregagens, microestacas, ancoragens e meios de travamento, às quais apresentam uma aplicação bastante comum.

Relativamente à escolha da estrutura mais adequada, esta deve ser feita em função de diferentes factores (Barros *et al.*, 2015): factores físicos, como a altura, espaço disponível para a implementação, dificuldade de acesso à área, subcarga criada, etc; factores geotécnicos, como o tipo de solo a ser contido, a presença do lençol freático, capacidade de suporte e apoio do solo; factores económicos, disponibilidade de materiais, mão de obra qualificada, tempo de execução, clima e o custo final. Só com uma análise realizada por pessoal experiente e baseada nas características locais é possível realizar uma estabilização correcta e viável.

Para além da aplicação destas medidas, é fundamental que haja uma monitorização constante da instabilidade, das estruturas e dos eventos que podem desencadear movimentos e pôr em perigo os elementos de risco. Desta forma, sugere-se que seria importante:

- realizar o levantamento, acompanhamento e monitorização de zonas críticas com implicações a nível da população, de modo a minimizar perdas e danos;
- assegurar a manutenção e requalificação de muros de suporte e estruturas de drenagens existente ou novas que se construam, assegurando a sua eficiência;
- desenvolvimento de sistemas de monitorização e aviso prévio com base em sensores. Verificação da localização, dimensão, actividade, taxa e velocidade do movimento com recurso a monitorização através de instrumentos de medição de deformação da superfície (inclinómetros, fissurómetros, defletómetros...), dados de satélite (SAR e INSAR) em conjugação com dados meteorológicos e sísmicos. Seria também importante verificar a posição de níveis de água e as suas fontes, evidenciando perdas nas canalizações ou entrada de água por regas. Fontes que normalmente não são equacionadas nos modelos, mas que se sabe ter um contributo significativo para o desencadeamento de movimentos em meio urbano;
- desenvolvimento e planeamento de planos de gestão de risco, com base em conhecimentos concretos sobre o fenómeno actuantes em cada local, obtidos pela conjugação de informação de modelos de susceptibilidade, monitorização, etc;
- discriminação de usos e ocupação do solo para as zonas instáveis, com a definição dos usos e actividades específicas que podem ser implementadas tendo em conta as classes de susceptibilidade;
- regulamentação ou desencorajamento do desenvolvimento em zonas instáveis, quando a sua ocupação ainda não se encontra estabelecida;
- em situações mais graves ou inevitáveis, a interdição da expansão urbana ou, até mesmo, a evacuação de zonas perigosas;
- desenvolvimento de planos de socorro, emergência e evacuação de zonas de risco para que a resposta seja o mais eficiente possível quando necessário;
- disseminação de planos de sensibilização e educação da população;
- desenvolvimento de planos de observação e reporte de inícios de instabilidade para a população.

Estas são algumas das medidas que poderão ser aplicadas na gestão e mitigação do risco de ocorrência de movimentos de massa em vertente. É conhecido que, algumas destas medidas já são aplicadas em Lisboa, por exemplo, a existência de estruturas de contenção/suporte, de drenagem de taludes e até, de sensibilização e lançamento de plataformas de reporte de indícios de movimentos para a população. No entanto, seria interessante a verificação e levantamento das zonas instáveis, de modo a conhecer-se os locais em risco e poder-se aplicar monitorização adequada. Posteriormente, o desenvolvimento de medidas de estabilização baseadas no conhecimento adequado dos movimentos e das suas características. Independentemente desta identificação, é importante que haja um controlo restrito do desenvolvimento urbano com implementação de edifícios com fundações adequadas, a aplicação de sistemas de aviso e planos de socorro, emergência e evacuação, de modo a que qualquer fenómeno danoso possa ter uma resposta adequada dos meios e diminuir o risco para o mínimo possível.

Na Colina do Castelo é a zona onde existem mais locais susceptíveis identificados pelo modelo. Este local, é dos poucos na freguesia onde pontualmente existe exposição do declive, sendo por isto, o único sítio onde pode ser considerada a implementação de vegetação adequada e drenagem dos declives. Para as restantes zonas, densamente urbanizadas, o controlo, a monitorização e o reforço das estruturas existentes é fundamental para evitar possíveis danos em locais não espectáveis. Por sua vez, em zonas onde não existem medidas aplicadas, deve ser feito um estudo para a identificação das estruturas mais adequadas a implementar, tendo em conta as condições locais e o espaço existente.

14. Discussão de Resultados e Conclusão

Os objectivos iniciais do trabalho consistiam numa avaliação da susceptibilidade de movimentos de massa em vertente num contexto urbano limitado (freguesia de Santa Maria Maior em Lisboa), através da análise com um modelo de base física. Paralelamente, pretendia recolher-se dados de edificado posicionado sobre zonas já consideradas susceptíveis e perceber se, através das patologias identificadas, se haveria indícios para supor uma instabilidade dos terrenos. No final, com estes dados e a sua comparação e correlação, propor medidas de mitigação que se adequassem à área de estudo e que pudessem ser adoptadas para trabalhos futuros de prevenção de risco.

Nos trabalhos mais iniciais, começou por se caracterizar as características geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas e geotécnicas da freguesia. Procedeu-se ao mapeamento de vários parâmetros como, modelo digital do terreno, declive, profundidade dos níveis de água, profundidade dos depósitos de cobertura, zonamento geotécnico, variação da resistência à penetração dinâmica e dados de precipitação. Desta forma, foi possível caracterizar e analisar a variação de cada um destes parâmetros e ainda fazer algumas observações e correlações.

Numa segunda fase, procedeu-se à recolha dos parâmetros de entrada dos modelos de avaliação de susceptibilidade. Os modelos adoptados para a realização do mapa de susceptibilidade foram o modelo geológico do Talude Infinito de Sharma (2002) e hidrogeológico *SHALSTAB* de Montgomery & Dietrich (1994). Para a sua elaboração foi necessário proceder à pesquisa, recolha e tratamento de dados diversos em relatórios geológicos/ geotécnicos, hidrogeológicos e na literatura de modo a obter uma representação o mais aproximada possível das características locais. Os dados necessários para o desenvolvimento do modelo são: mapa geológico, já elaborado pela CML; mapa de declives, obtido através de curvas de nível e pontos cotados com os quais foram realizados um MDT e, posteriormente, o mapa de declives; mapa de uso e ocupação do solo, obtido por conjugação de informação existente sobre espaços verdes com os layer de edificado e vias; parâmetros geológicos e geotécnicos: peso específico, peso específico submerso, peso específico saturado, ângulo de atrito interno e coesão; parâmetros hidrogeológicos: condutividade hidráulica, transmissividade e área de drenagem; dados de precipitação; espessura de solo potencialmente instável; razão entre a espessura de solo saturado e espessura de solo potencialmente instável.

Os parâmetros geológicos e geotécnicos foram recolhidos de relatórios geológicos/ geotécnicos e de bibliografia. Este foram sujeitos a organização e análises estatísticas e, posteriormente, procedeu-se à sua retroanálise para a calibração, com o objectivo de obter os valores de coesão e ângulo de atrito interno para os quais se desencadeariam movimentos de vertente ($FS < 1$). Os valores de peso específico saturado e submerso foram recolhidos de dados publicados Sobral (2018).

Os parâmetros hidrogeológicos foram recolhidos de relatórios técnicos e bibliografia. Estes foram sujeitos a análises estatísticas e a correlações empíricas. Os dados obtidos foram adaptados de modo a representarem as formações geológicas tendo em conta as suas características geológicas e aptidões hidrogeológicas. A área de drenagem foi elaborada com recurso ao programa *ArcView 3.1* compatível com a ferramenta *SHALSTAB*.

Os dados de precipitação utilizados foram medidos na estação meteorológica do IDL, no Jardim Botânico da UL, e correspondem a valores de precipitações diárias com extensão temporal de 1941 a 2019. Estes dados foram trabalhados e, com recurso as expressões de Zêzere *et al.*, (2005) realizadas para a zona Norte de Lisboa, calculou-se os limiares de precipitação crítica para um cenário de 1 dia de precipitação.

A espessura de solo potencialmente instável foi calculada com recurso a dados da distribuição em profundidade das formações geológicas presentes em sondagem, valores de ensaio SPT e de correlações teóricas de parâmetros geotécnicos (ângulo de atrito interno e coesão de Vallejo *et al.*, (2002) e Bowles (1997)) com os valores obtido em ensaios SPT. Após correlação, obteve-se os valores de resistência à penetração dinâmica para os quais as formações se podem considerar potencialmente instáveis e mapeou-se a profundidade até à qual esses valores de N_{SPT} se registavam. Para efeito de aplicação nos modelos, o produto final foi limitado a um valor máximo de 4m de profundidade, valor adequado a instabilidade superficial e para o qual os modelos não apresentam resultados finais espúrios.

A razão entre a espessura de solo saturado e espessura de solo potencialmente instável (variável m), foi calculada pela aplicação do modelo *SHALSTAB* de Montgomery & Dietrich (1994). Utilizou-se um cenário de 1 dia de precipitação efectiva ($Cr=0,1144m$) e acrescentou-se um elemento à expressão que representa o factor de infiltração (f_i) de água no solo na freguesia (Vasconcelos, 2011).

Por fim, para a obtenção do FS, aplicou-se o modelo do Talude Infinito de Sharma (2002). O resultado final consiste num mapa do factor de segurança para a área de estudo, que foi validado por comparação com inventários. Para a validação ser possível foram criados dois inventários, um de movimentos ocorridos e outros de indícios no edificado. Estes inventários foram utilizados para a elaboração da curva ROC e para a obtenção da AAC. O mapa de susceptibilidade final obteve uma AAC de 0,80, para a validação com os 2 inventários juntos. Esta AAC insere o modelo, segundo a classificação de Guzzetti (2005), nos modelos de qualidade aceitável a boa. Deste modo, obtêm-se um mapa de susceptibilidade final, onde se evidenciam as zonas susceptibilidade muito alta a muito baixa. Nas zonas classificadas como muito alta a moderada, demarcando os relevos da Colina do Castelo e Colina de São Roque, deve ter-se em atenção todas as práticas realizadas, sendo que, deve ser feita uma avaliação prévia da sua estabilidade. Já as zonas classificadas com susceptibilidade baixa a muito baixa, essencialmente zonas com baixos declives como o Esteiro da Baixa, podem ser utilizadas para o desenvolvimento urbano, uma vez que, são consideradas adequadas para o efeito, relativamente a eventos deste fenómeno em específico.

Comparando a cartografia de susceptibilidade obtida e a cartografia pré-existente da freguesia é possível concluir que, apesar de o modelo antigo prever a maioria das áreas susceptíveis, terá ocorrido a identificação de áreas mais extensas e outras novas com susceptibilidade muito elevada a moderada. Deste modo, pode concluir-se que o novo modelo apresenta um melhoramento, principalmente a nível do pormenor de identificação das áreas susceptíveis, relativamente ao anterior.

Para a identificação de zonas com indícios de instabilidade, na campanha de campo procedeu-se à descrição das fachadas exteriores do edificado e à identificação de patologias que pudessem indicar indícios de deformação do solo. A campanha abrangeu 19 áreas consideradas susceptíveis pelo mapa de susceptibilidade da CML, nas quais foram descritos 1397 edifícios e 35 muros. Num balanço geral, os edifícios apresentavam bom estado de conservação (79%), eram estruturas mistas (97%) e, a maioria, não apresentava evidências recentes de intervenções ou alterações (55%). Relativamente as patologias estruturais, 45% não tinham patologias (classe IV). Em contraste, 36% tinham patologias inseridas na classe I, 14% na classe II e 3% na classe III. Detectou-se que haveria edifícios com mais que uma patologia incidente, num máximo de 4 coexistentes. As patologias mais comuns detectadas foram fissuras, reboco em desagregação, fendas, empolamento e desagregação do material de alvenaria.

Comparando estes dados com a geologia do substrato, a maior representação das patologias ocorreu nas formações M_{III} , M_{IVa} e M_{IVb} . Na classe I, predominaram patologias nas formações M_{IVb} (26%), M_{III} (21%) e M_{IVa} (17%). Para a classe II, nas formações M_{III} (33%), M_{IVb} (28%) e M_{IVa} (20%).

Por fim, para a classe III, predomina nas formações M_{III} (29%), M_{vaI} , M_{Ivb} e M_{Iva} (19%). Podemos concluir que a maior observação ocorreu nas formações M_{III} , M_{Iva} e M_{Ivb} .

Relativamente aos muros, descreveu-se muros de gravidade em betão simples, em pedra e betão armado e muros consola/ parede ancorada. A maioria encontrava-se em bom estado de conservação (69%) e sem indícios de intervenções (83%). Os que apresentavam intervenção recentes não tinham qualquer patologia incidente, mas os restantes apresentaram patologias de classe I e II (37%) e classe III (9%). Foram identificadas até 2 patologias incidentes em simultâneo, sendo as mais comuns fissuras e fendas. Da restante informação recolhida, apenas 34% dos muros teria drenagem e 3% (1 muro) estava a ser monitorizado.

Tendo obtido o mapa de susceptibilidade final procurou-se perceber se os dados recolhidos na campanha de campo conseguem evidenciar a existência de instabilidade. Para tal, comparou-se o estado de conservação e as patologias identificadas no edificado com as zonas susceptíveis identificadas pelo modelo geológico. Pode concluir-se que, a classe I e IV são as que, em cada FS, apresentam maior representação, o que é expectável pois foram as classificações mais comuns descritas durante o trabalho de campo. Para as classes de susceptibilidade mais elevadas, as patologias (conjuntamente as classes I, II e III) constituem sempre mais de 50% dos dados, apresentando uma diminuição do seu valor conforme a susceptibilidade diminui. Já para os edifícios sem patologias dá-se o processo contrário, o que seria espectável. Deste modo, é possível evidenciar que existe uma certa associação, entre as patologias identificadas nos edifícios ou falta delas, e a susceptibilidade à ocorrência de movimentos massa em vertentes. Ainda que não seja possível associar classes específicas de patologias às classes de susceptibilidade, devido ao baixo número de edifícios identificados com classes de patologias mais graves, pode considerar-se que um estudo adequado e mais generalizado das patologias dos edifícios e de áreas específicas, poderá ser um bom indicador da existência de instabilidade.

Com a correlação de todos os dados e características urbanas da freguesia de Santa Maria Maior, propõem-se algumas medidas de mitigação que poderão ser adequadas à minimização do risco de ocorrência de movimentos de massa em vertente. A abordagem principal é a identificação de zonas instáveis e a sua monitorização, permitindo uma definição completa das características da zona instável e a identificação dos elementos expostos ao risco. Tendo esta informação, poderá implementar-se medidas de estabilização que englobem métodos mais simples, económicos e bastante eficientes, como a implementação de vegetação nos solos expostos, alterações físicas do solo *in situ*, alterações da geometria do talude e implementação de sistemas de drenagem, por exemplo. Porém, quando os elementos referidos anteriormente não são adequados ou suficiente, propõem-se a construção de estruturas de estabilização e contenção, como muros de gravidade, paredes moldadas, entre outras. Estas estruturas são mais complexas e adequam-se a condições mais específicas. Para estas últimas, é extremamente fundamental o conhecimento geológico, geotécnico, hidrogeológico do local e o reconhecimento dos elementos de risco e características locais da zona urbana para que a estrutura escolhida seja a mais adequada possível a cada situação.

Com o mesmo objectivo de mitigar o risco, sugere-se que haja um investimento significativo em monitorização, com desenvolvimento de sistemas eficientes de monitorização das zonas instáveis, que considerem indícios de deformação e de factores desencadeantes, possibilitando o controlo e previsão da ocorrência destes movimentos. Aliado à monitorização geral da instabilidade, propõem-se também que ocorra a monitorização, requalificação e reforço das estruturas pré-existentes ou das novas a serem implementadas. Aliados a estes sistemas, era importante considerar o desenvolvimento de sistemas de alerta e aviso da população, para além do desenvolvimento e implementação de planos de planeamento e gestão do risco e de socorro e emergência. Por último, considera-se importante mitigar os riscos com recurso à sensibilização e educação da população e, em situações extremas, recorrer a

desencorajamento da construção, regulamentação do seu desenvolvimento e à interdição do uso ou a evacuação dos locais de risco.

Concluído este trabalho, é possível inferir que o modelo de base física utilizado poderá ser adequado ao estudo da susceptibilidade em ambiente urbano, sendo considerado um modelo preditivo aceitável. Para além disto, foi possível verificar que os indícios de patologia no edificado poderão ser indicadores para a identificação de zonas instáveis e para a validação do modelo. Relativamente as medidas de mitigação, foi essencial todo o trabalho no desenvolvimento do mapa de susceptibilidade e de trabalho de campo, de modo a que, as medidas apresentadas, ainda que gerais, fossem ao encontro das características e necessidades existentes na freguesia.

No que diz respeito ao estágio, este foi extremamente importante para o desenvolvimento de novas competências e para a consolidação de outras adquiridas anteriormente no contexto do mestrado. A integração numa equipa de geólogos mais ligados à geotecnia e hidrogeologia permitiu aprofundar conhecimentos sobre estes temas e o desenvolvimento de competências que, até ao momento, não tinham sido muito trabalhadas. O facto de ter tido um contacto constante com os relatórios geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos permitiu um aumento do conhecimento geológico de mecânica dos solos, geotecnia e hidrogeologia. Para além disto, possibilitou a análise e tratamento de dados reais e complexos, que têm de ser sujeitos a análise e interpretação crítica. Tudo isto contribuiu para o desenvolvimento do conhecimento geológico geral e desta área de Lisboa, e para um desenvolvimento do pensamento crítico perante este tipo de problemática. Ademais, a utilização constante do software *ArcGIS* para a modelação dos dados permitiu o desenvolvimento de competências em ambiente SIG através da utilização de novas ferramentas de tratamento e modelação de parâmetros. Assim, o estágio foi extremamente positivo, permitindo o desenvolvimento de novas competências profissionais e pessoais, as quais poderão ser utilizadas no futuro nesta ou nas mais diversas áreas.

15. Considerações Finais

Com a elaboração deste trabalho percebeu-se que estes modelos físicos podem ser aplicados a áreas densamente urbanizadas e alteradas, desde que a densidade de dados disponíveis seja suficiente para que haja uma boa caracterização das características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas do solo. No entanto, seria interessante verificar se existiriam outros modelos mais complexos que se adequassem também a este fim.

Para trabalhos futuros sugeria-se que aos dados de campo fossem adicionadas descrições mais completas, englobando todas as fachadas dos edifícios e suas caixas de escada. Deste modo seria possível descartar alguns problemas estruturais do edifício correlacionados com a sua má construção/manutenção e realizar uma caracterização mais profunda da instabilidade que pudesse ser identificada. Para além de que, contribuiria para um inventário de campo mais completo, onde a identificação de patologias associadas à deformação/ instabilidade dos solos ou às classes de suscetibilidade seria facilitada. Ademais, propõem-se que sejam recolhidas informações de elementos funcionais com contabilização e especificação dos elementos estratégicos/fundamentais para resposta e emergência. Esta informação permitira, num trabalho futuro, criar uma abordagem de avaliação de risco para a freguesia.

A nível de subsolo, propõem-se a integração de dados de caves para a modelação da circulação preferencial da água subterrânea, com possível interpretação de zonas de retenção de água, e a integração

de dados de adição de água aos sistemas por meio de perdas no fornecimento de água ou zonas de rega intensiva.

Por fim, relativamente à proposta de medidas de mitigação adequadas a cada local específico, poderia fazer-se uma modelação dos movimentos para as zonas instáveis, de modo a melhorar a perceção do problema e a indicação de medidas de estabilização adequadas a cada caso específico.

16.Referências

- Abramson, L.E., Lee, T. S., Sharma, S. & Boyce, G. M. (2002). Slope stability and stabilization methods. John Wiley & Sons, Inc., New York, p.712.
- Afonso, A, F, G. (2016). *Correlação entre os resultados de ensaios in situ de penetração dinâmica DP com o ensaio standard penetration test*. Relatório final de projecto para a obtenção do grau de mestre em Engenharia de Construção, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança.
- Aleotti, P. C. (1999). Landslide hazard assessment: Summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. **Vol. 58**, pp: 21-44.
- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **Vol.58**, pp: 21-44.
- Almeida, C., Mendonça, J. J. L., Jesus, M. R., & Gomes, A. J. (2000). *Sistemas aquíferos de Portugal continental*. Sistema aquífero: Orla Ocidental. Instituto da Água, Lisboa, **Vol. 2**, pp.134-136.
- Almeida, F. M. (1986). Carta Geológica do Concelho de Lisboa. Escala 1:10 000. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa.
- Almeida, I. M. B. M. (1991). *Características Geotécnicas dos Solos de Lisboa*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, na especialidade de Geotecnia. Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Almeida, I. M., Lopes, I. F., Almeida, F. e Teves Costa, P. (1997). Caracterização Geotécnica da Colina do Castelo. Abordagem Preliminar para a Estimativa do Risco Sísmico. 3º Encontro sobre Sismologia e Engenharia Sísmica, IST, Lisboa, pp.129-136.
- Almeida, I., Mendonça, J. L., Silva, M., Almeida, G., & Fonseca, C. (2003). As condições hidrogeológicas e o comportamento geotécnico dos terrenos no Bairro da Bica, Lisboa. Em: Geologia da Engenharia e os Recursos Geológicos, **Vol. I**. Coimbra, 2003, Universidade de Coimbra.
- Amaral, P. R., Marques, J. L., Zêzere, G., Queiroz, F. & Marques, F. (2009). Aplicação de um modelo hidrológico e geotécnico à instabilidade de vertentes desencadeada por precipitação intensa no concelho da Povoação (S. Miguel, Açores). Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos, **Vol. VI**, APGEOM, Braga, 2009, pp. 133-138.
- Andrade, C. F. (1935). Memória descritiva sobre a modificação a introduzir na actual captagem da “Alcalina” das Alcaçarias do Duque. p.47.
- Barros, P. L. A., Fracassi, G., Duran, J. S. & Teixeira, A. M. (2015). Obras de contenção. Manual técnico
- Baum, R. L. & Godt, J. W. (2010). Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. *Landslides*, **Vol.7**, pp.259-272.
- Bi, J. & Bennett, K., P. (2003). Regression Error Characteristic Curves. Proceedings of the Twentieth International conference on Machine Learning (ICML-2003), Washington D.C, pp.43-50.
- Bowles, J. E. (1997). Analysis and design of foundations. *McGraw-Hill Company*, New York.

- Brabb, E. E. (1984). Innovative approaches to landslides hazard mapping. Proceedings 4th International Symposium on Landslides, Toronto, **Vol.1**, pp.307-324
- Braga, A. C. S. (2000). *Curvas ROC: aspectos funcionais e aplicações*. Dissertação de Doutoramento no Ramo de Engenharia de Produção e Sistemas, Área de Métodos Numéricos e Estatísticos na Universidade do Minho.
- Brito, C. S. B. P (2017). *Estabilização de talude em meio urbano. Caso de estudo- reforço e reconstrução de muros de suporte*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico.
- Carrara, A. (1983). A multivariate model for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, **Vol.15**, pp: 403-426.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*. **Vol.16** n.5, pp: 427 – 445.
- Catani, F., Segoni, S. & Falorni, G. (2010). An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Water Resources Research*. **Vol. 46**: W05508.
- Choffat P. (1895-1898). Les eaux d'alimentation de Lisbonne- rapport entre leus origine géologique et leur composition chimique. Comunicações da Direcção dos Trabalhos Geológicos de Portugal. Tomo III, pp.145-198.
- Cotter, J.C.B. (1956). O Miocénico marinho de Lisboa. Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal, XXXVI. p.170.
- Crozier, M. (1986). Landslides: causes, consequences and environment. *Croom Helm*, London, p. 252.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes. Transportation research board special report, n.247.
- Cruden, D. M. (1991). A simple definition of landslide. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.
- Dai, F. C., Lee, C. F. & Ngai, Y. Y. (2001). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering geology*, **Vol.64**, n.1, pp. 65-87
- Di Martine, D., De Rosa, D., Pesce, V., Santangelo, M. A. & Calterra, D. (2012). Landslide Hazard and land management in high-density urban areas of Campania region, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **Vol.12**, n.4, pp. 905-926.
- Dietrich, E. W., Reiss, R., Hsu, M. L. & Montgomery, D. R. (1995). A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Process*. **Vol 9**: pp. 383-400.
- Dietrich, W. E. & Montgomery, D. R. (1998). SHALSTAB A digital terrain model for mapping shallow landslide potential. National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement, Technical Report.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslides susceptibility hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology. Elsevier*, **Vol.102**, pp.85-98.

- Fukuaka, M. (1980). Landslides associated with rainfall. *Geotechnical Engineering*, **Vol. 11**, pp. 1-29.
- Garcia, R. A. C. (2002). *Avaliação do risco de movimentos de vertente na Depressão da Abadia (Torres Vedras)*. Dissertação de Mestrado em Geografia Física e Ambiente, Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Garcia, R. A. C. (2012). *Metodologia de avaliação da perigosidade e risco associado a movimentos de vertente: aplicação na bacia do rio Alenquer*. Dissertação de doutoramento em Geografia Física apresentada ao Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa.
- Glade, T., Anderson, M. & Crozier, M. J. (2005). Landslides Hazard and risk. *John Wiley & Sonns*, Ltd.
- Glinski, J. & Lipiec, J. (1990). Soil physical conditions and plant roots. CRC Press Inc, Boca Raton.
- Gorski, C. M. F. M. (2010). *Estabilização de solos argiloso com ligante hidráulico LIPIDUR DS*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil: Geotecnia e Ambiente. Universidade da Beira Interior.
- Gostelow, P. (1991). Rainfall and landslides. Prevention and control of landslides and other mass movements. Edited by: Almeida Teixeira, M., Fantechi, R., Oliveira, R., & Gomes Coelho, A., CEC, Brussels, pp 139-161.
- Guzzetti, F. (2005). *Landslide Hazard and Risk Assessment*. PhD Thesis. Mathematics-Scientific Faculty, University of Bonn, Bonn, Germany.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. & Reichenbach, P. (1999). Landslides Hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, **Vol.31**, pp:181-216.
- Guzzetti, F., Stark, C.P. & Salvati, P. (2005). Evaluation of flood and landslide risk to the population of Italy. *Environmental Management*, **Vol. 36**, n. 1, pp. 15-36.
- Harold, T, R. & Liang, R. (1978). Recognition and Identification. Schuster, R, L & Krizek, R, J.(eds), Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board Special Report, **Vol.176**. National Academy of Sciences, Washington, D.C, pp.34-79.
- Harp, E., Michael, J. A. & Laprade, W. (2006). Shallow-Landslide Hazard Map of Seattle, Washington. U.S. Geological Survey Open-File Report 1139.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014). The Varnes Classification of Landslide Type, an update. *Landslides*, **Vol 11**, pp 67-194.
- Hutchinson, J. N. (1995). Keynote paper: Landslide hazard assessment in Bell (Eds.). *Landslides*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp: 1805 – 1841.
- Iverson, R. M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, **Vol.36**, n7, pp.1897–1910.
- Jim, C. Y. (1993). Soil compaction as a constraint to tree growth in tropical & subtropical urban habitats. *Environment Conservation*, **Vol. 20**, n.1, pp: 35–49.
- Lerner, D. N. (1990). Groundwater Recharge in Urban Areas. Hydrological processes and water management in urban areas, IAHS. The Netherlands, *Vol.198*, pp.59-65. In

- Lima, J. L. M. P., Martins, C. M. T., Mendes, M. D. G. T., Abreu, J. M., de Almeida, J. P. L. & Lima, I. P. (2010). Hidrologia urbana: conceitos básicos. Série Cursos Técnicos, **Vol. 1**, pp. 143-169.
- Marques, F. M. S. F. (2008). Desastres Naturais, minimizar o risco, maximizar a consciencialização, Instabilidade de Vertentes: previsão, prevenção e tratamento. Ano Internacional do Planeta Terra, Lisboa. pp.17-18.
- Martins, C. M. T., Mendes, M. G. T., Abreu, J. M., Almeida, J. P. L., Lima, J. P. & Lima, I. P. (2010). Hidrogeologia Urbana: conceitos básicos. Série Cursos Técnicos, n.1.
- Mather, J. R. (1978). The Climatic Water Budget in Environmental Analysis. *Lexington Books*, Lexington, Mass.
- Melo, R. S. R. A. (2018). *Modelação de deslizamentos superficiais e escoadas de detritos com métodos estatísticos e determinísticos*. Tese de doutoramento em Geografia, especialidade de Geografia Física. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
- Mesri, G. & Abdel-Ghaffar, M. E. E. (1993). Cohesion intercept in effective stress-stability analysis. *Journal of Geotechnical Engineering*, **Vol.119**, n.8, 1229-1249
- Almeida, F, M. (1972). Parecer hidrogeológico sobre uma sondagem executada no Largo do Chafariz de Dentro para o Metropolitano de Lisboa. Revista da Faculdade de Ciências, 2ª série. C – Ciências Naturais, **Vol. XVII** – Fasc. 1º, pp. 187-196.
- Monition, L. (1977). Effets de l'urbanisation sur les eaux souterraines. In Actes du colloque AISH Amsterdam, Octobre 1977, UNESCO *Studies and reports in hydrology*. pp. 162-166.
- Monteiro, J. P. & Salvador, N. (2012) A definição territorial dos “sistemas hidrológicos naturais” enquanto “entidades cartográficas” sobre as quais se estruturam os Planos de Gestão de Bacia Hidrográfica (PGBH). Os futuros e sempre renovados. Em: Workshop Prowaterman: Água, Ecossistemas Aquáticos e Actividade Humana. 2012, Universidade do Algarve.
- Montgomery, D. R. & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, **Vol. 30**, no. 4: pp. 1153-1171.
- Montgomery, D. R., Sullivan, K. & Greenberg, H. (1998). Regional test of model for shallow landsliding. *Hydrological Processes*, **Vol.12**, pp:943-945.
- Mulyono, A., Subardja, A., Ekasari, I., Lailati, M., Sudirja, R. & Ningrum, W. (2018). The Hydromechanics of Vegetation for Slope Stabilization. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.
- O’Loughlin, E. M. (1986). Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*, **Vol. 22**, pp. 794-804.
- Pais, J., Moniz, C., Cabral, J., Cardoso, J. L., Legoinha, P., Machado, S., Morais, M. A., Lourenço, C., Ribeiro, L., Henriques, P. & Falé, P. (2006). Notícia Explicativa da folha 34-D, Lisboa. Carta Geológica de Portugal, escala 1:50 000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- Paredes, D., Trigo, R. M., Garcia-Herrera, R. & Trigo, I. F. (2006). Understanding precipitation changes in Iberia in early Spring: weather typing and storm-tracking approaches. *Journal of Hydrometeorology*, **Vol.7**, n.1, pp.101-113.
- Piedade, A. M. M. (2009). *Modelação espacial em Sistemas de Informação Geográfica da susceptibilidade a deslizamento na área de Lousa- Loures*. Dissertação de Mestrado em Gestão do

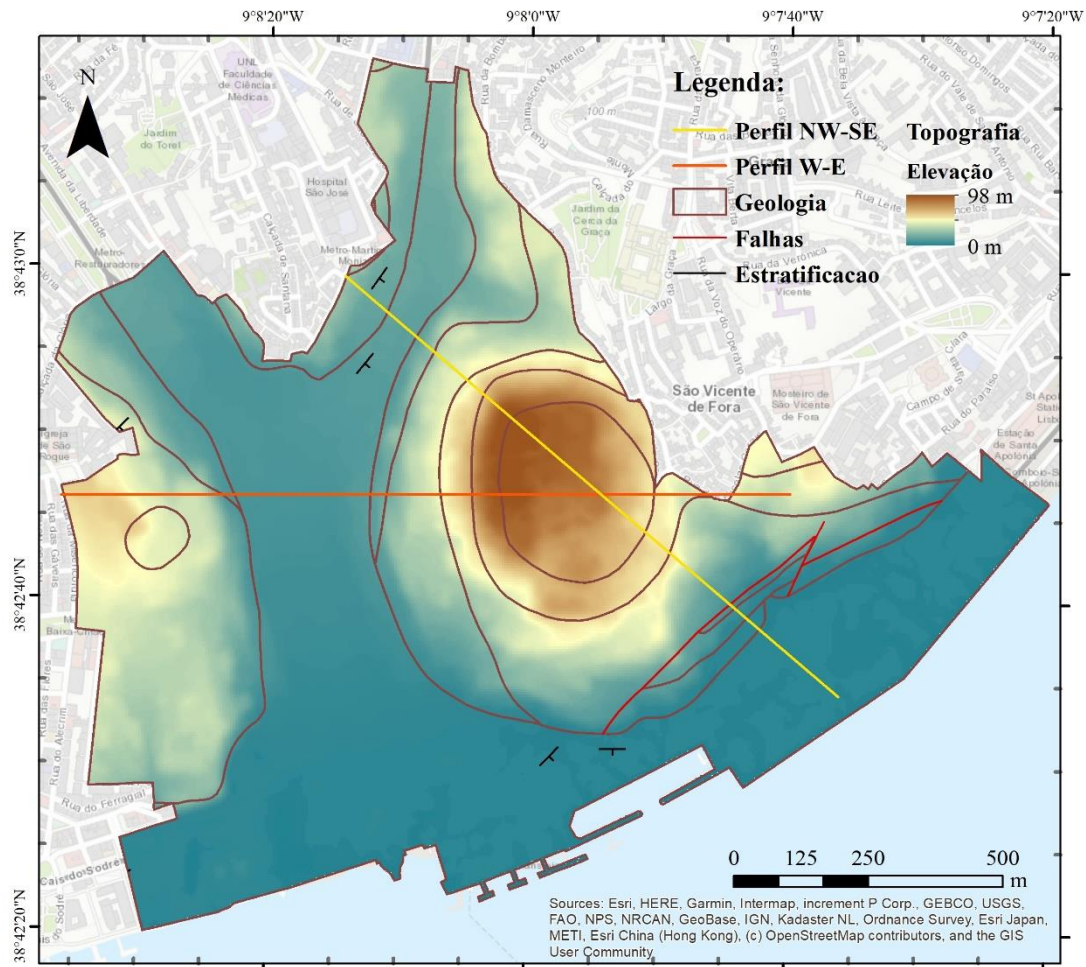
- Território, área de especialização em Detecção Remota e Sistemas de Informação Geográfica. Faculdade de Ciências Sociais e Humanas da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Piedade, A. M. M., Zêzere, J. L., Garcia, R. A. C. & Oliveira, S. C. (2011). Modelos de susceptibilidade a deslizamentos superficiais translacionais na região a norte de Lisboa. *Finisterra*, **Vol.46**, n.91.
- Pimenta, R. S. G. G. (2011). *Avaliação da susceptibilidade à ocorrência de movimentos de vertente com métodos de base física*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Pinto, C. (2003). *Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Concelho de Lisboa–Zona Ocidental*. Relatório de Estágio Profissionalizante.
- Pinto, C. (2020). Textos não publicados.
- Quaresma, I. (2008). *Inventariação e análise de eventos hidro-geomorfológicos com carácter danoso em Portugal continental*. Tese de mestrado em Geografia Física na Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, p.100.
- Ramalho, E. & Lourenço, M. (2006). As águas de Alfama como património hidrogeológico de Lisboa. Alfama Springs as an hydrogeological heritage of Lisbon. Actas do VII Congresso Nacional de Geologia, 29 de Junho a 13 de Julho de 2006.
- Schmidt, J. & Michael, A. (2004). Rainfall Infiltration Under Urban Soil Surface Conditions, Experiment and Model Results. ISCO 2004 - 13th International Soil Conservation Organization Conference – Conserving Soil and Water for Society: *Sharing Solutions*. Brisbane. Paper n. 407, p. 6.
- Sharma, S. (2002). Slope Stability Concepts. In Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S. E., Boyce, G. M. (Eds). *Slope Stability and Stabilization Methods*. John Wiley & Sons, Inc., New York. pp. 329-461.
- Silva, R. A. F. (2012). *Aplicação da Engenharia Natural na Estabilização de Taludes*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil no Centro de Ciências Exatas e da Engenharia (CCEE) da Universidade da Madeira.
- SNIRH (1995-2021). Sistemas Aquíferos: Unidades Hidrogeológicas. <https://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=4&idItem=3&idISubtem=link4> [16 de Março de 2020].
- Sobral, M. S. (2018). *Susceptibilidade à ocorrência de escorregamentos nas vertentes do limite Norte do Concelho de Almada utilizando métodos de base física*. Dissertação de Mestrado em Geologia Aplicada, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Soeters, R. & Van Westen, C. J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. Turner, A, K. & Schuster, R, L. (eds), *Landslide: Investigation and Mitigation*. Special report, **Vol. 247**. Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C, pp.129-177.
- Stone, B., & Bullen, J. L. (2006). Urban form and watershed management: how zoning influences residential stormwater volumes. *Environment and Planning B: Planning and Design*, **Vol. 33**, pp. 21-37.
- Terzaghi, K. & Peck, R. B. (1948). *Soils Mechanics in Engineering Practice*. Edition John Wiley and Sons. New York.

- Trigo, R. M., Pozo-Vázquez, D., Osborn, T. J., Castro-Díez, Y., Gámiz-Fortis, S. & Esteban-Parra, M. J. (2004). North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, **Vol.24**, n.8, pp. 331-354.
- Trigo, R. M., Zêzere, J. L., Rodrigues, M. L. & Trigo, I. F. (2005). The influence of the North Atlantic Oscillation on rainfall triggering of landslides near Lisbon. *Natural Hazard*, **Vol. 36**, n.3, pp. 331-354.
- Turner, A. K. & Schuster, R. L. (eds.) (1996). *Landslides: Investigation and Mitigation*. Washington, D.C., National Research Council, Transportation Research Board Special Report 247, p.673.
- Vallejo, L. I. G., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación, Madrid. pp.80-89.
- Van Asch, T. W. J., Buma, J. & van Beek, L. P. H. (1999). A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology*. **Vol. 30**, pp. 25-32.
- Van de Ven, F. H. M. (1990). Water Balance of Urban Areas. Hydrological Processes and Water Management in Urban Areas, IAHS. The Netherlands, **Vol. 198**, pp. 21-32.
- Varnes, D. J. (1954). Landslide types and processes. In: Eckel EB (ed) *Landslides and engineering practice*, special report 28. Highway research board. National Academy of Sciences, Washington, DC, p. 20.
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R. e Krizek, R. (Eds) – *Landslides – Analysis and Control*. Special Report 176, Transportation Research Board, *National Academy of Science*, Washington D.C. Special Report 176, Chapter 2.
- Varnes, D., J., (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. United Nations Educational Scientific and Cultural Organization. UNESCO. Paris.
- Vasconcelos, M. & Fernando, M. (2011). Landslide Hazard assessment in urban areas – a case of study in Lisbon county (Portugal). *Geophysical Research Abstracts*, **Vol.13**, EGU General Assembly 2011.
- Vasconcelos, M. A. (2011). *Cartografia de Susceptibilidade à Ocorrência de Movimentos de Vertente em Contexto Urbano: O concelho de Lisboa*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Vaz, T. G. (2010). *Contribuição para o Estudo dos Movimentos de Vertentes Desencadeados por Eventos Sísmicos em Portugal Continental*. Tese de Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território.
- Yang, J. L., & Zhang, G. L. (2011). Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff. *Journal of soils and sediments*, **Vol. 11**, pp. 751-761
- Zêzere, J. L. (1997). *Movimentos de vertente e perigosidade geomorfológica na Região a Norte de Lisboa*. Dissertação de doutoramento em Geografia Física apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa. Lisboa.
- Zêzere, J. L. (2001). Distribuição e ritmo dos movimentos de vertente na região a Norte de Lisboa. Relatório n.38, Centro de Estudos Geográficos, Área de Geografia Física e Ambiente, Lisboa, p.167.
- Zêzere, J. L. (2005). *Dinâmica de Vertentes e Risco Geomorfológico: programa*.

- Zêzere, J. L., Ferreira, A. B. & Rodrigues, M. L. (1999). Landslides in the north of Lisbon region (Portugal): conditioning and triggering factors. *Physics and Chemistry of the Earth*, **Vol.24**, n.10, pp.925-934.
- Zêzere, J. L., Trigo, R. M. & Trigo, I. F. (2005). Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **Vol.5**, pp. 331-344.
- Zêzere, J. L., Trigo, R. M., Fragoso, M., Oliveira, S. C. & Garcia, R. A. C. (2008). Rainfall-triggered landslides in the Lisbon region over 2006 and relationships with North Atlantic oscillation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **Vol.8**, n.3, pp. 483-499.
- Zêzere, J., Reis, E., Garcia, R., Oliveira, S., Ferreira, A. B. (2004). Integration of spatial and temporal data for the definitions of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazard and Earth Systems Science*, **Vol.4**, n.1, pp.133-146.

17. Anexos

Anexo 1: Localização dos perfis geológicos realizados na área de estudo. Destaque para os limites geológicos, localização de falhas, estratificação e elevação da freguesia.



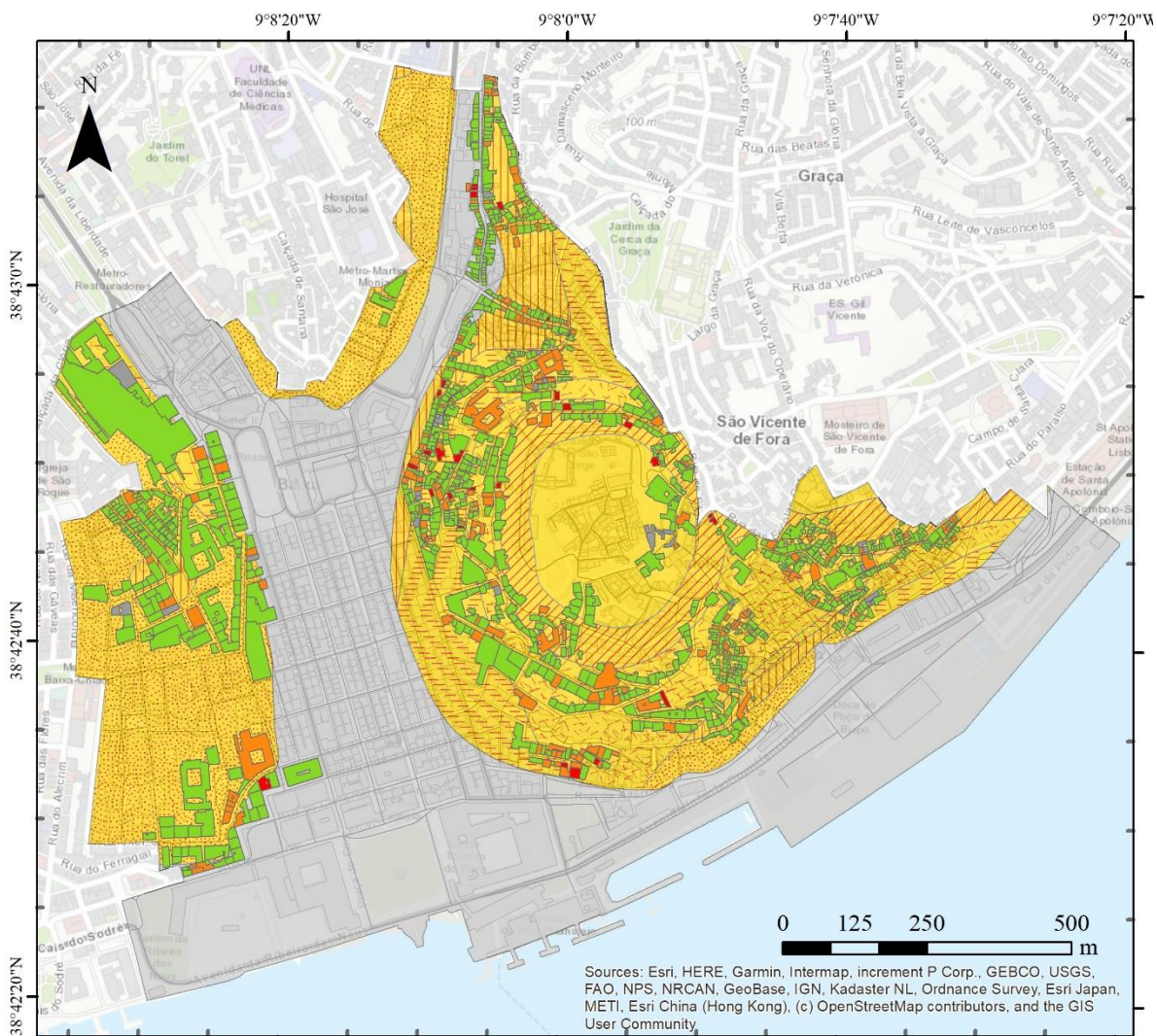
Anexo 2: Edifícios classificados como “médio” quanto ao estado de conservação da fachada principal, alguns exemplos. A e B: Beco das Canas, nº5-7; C e D: Largo de Santo Estevão, nº12-17. (destaque para as setas com direcção aproximada do ponto cardinal Norte)















Anexo 3: Edifícios classificados como “deficientes” quanto ao estado de conservação da fachada principal, alguns exemplos. A e B: Rua das Farinhas, nº33-41; C: Beco das Flores, nº23-25; D: Beco dos Fróis, nº1-7. (destaque para as setas com direcção aproximada do ponto cardinal Norte).



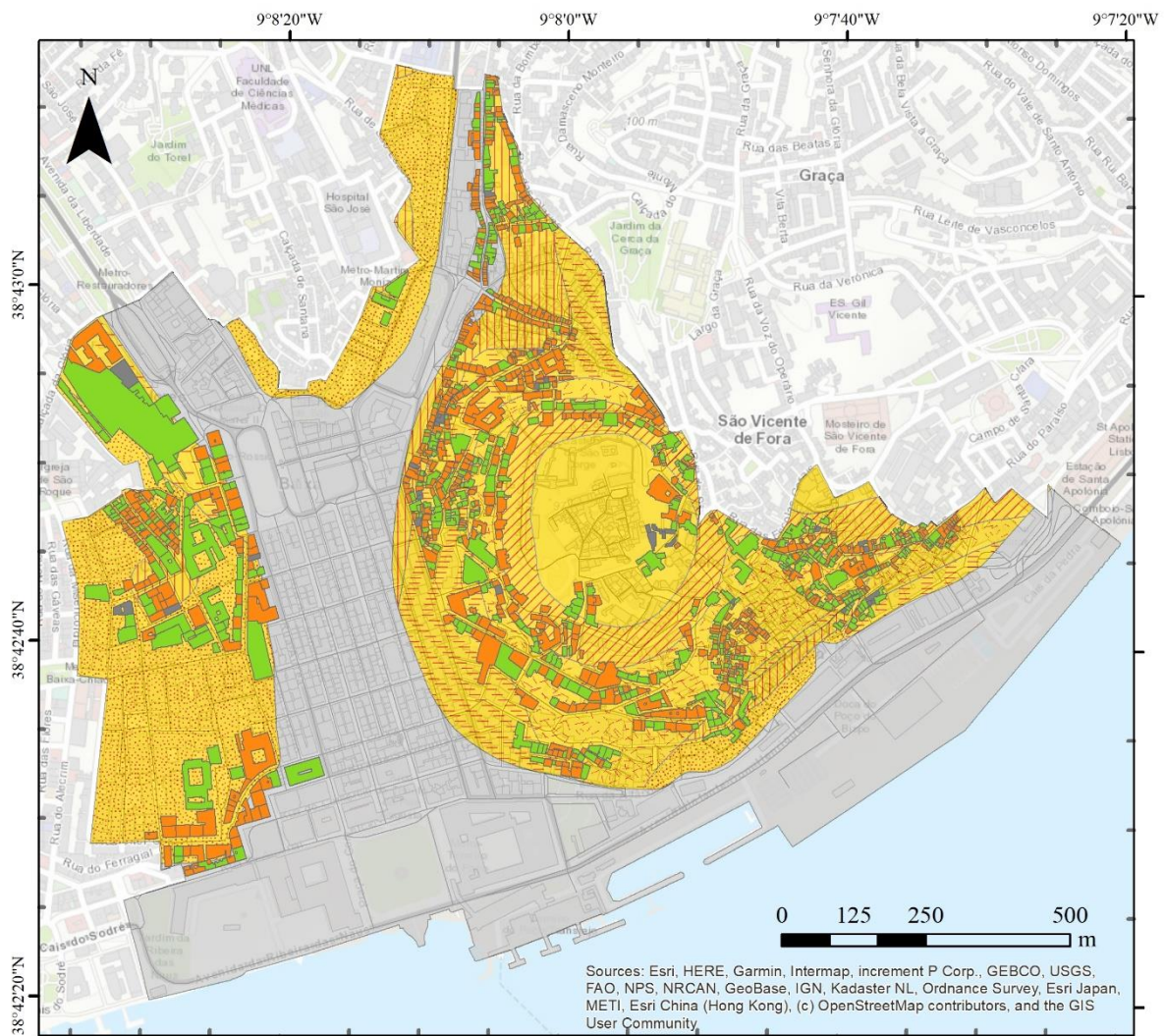
Anexo 4: Representação do edificado descritos na campanha de campo quanto à classificação do estado de conservação da fachada principal. Destaque para a sua posição sobre o substrato geológico da área de estudo.



Legenda:

 Edificado	Geologia
 Vias	Nome
Edificado Campo	 Aluviões e/ou aterros
Estado de Conservação	 Formação dos Calcários de Casal Vistoso (MVa1)
 Bom	 Formação das Areias de Quinta do Bacalhau (MIVb)
 Médio	 Formação das Argilas de Forno do Tijolo (MIVa)
 Deficiente	 Formação dos Calcários de Entrecampos ("Banco Real")(MIII)
 Em obras/ s/Info.	 Formação das Areolas de Estefânia (MII)

Anexo 5: Representação do edificado observado na campanha de campo conforme a classificação de Intervenções/ Alterações recentes na fachada principal. Destaque para a sua posição sobre o substrato geológico da área de estudo.



Legenda:

- Vias
- Edificado

- Edificado Campo**
- Intervenções/ Alterações recentes**
- Em obras
 - s/ Intervenções
 - c/ Intervenções

Geologia

Nome

- Aluviões e/ou aterros
- Formação das Areias com Placuna miocénica (MVA2)
- Formação dos Calcários de Casal Vistoso (MVA1)
- Formação das Areias de Quinta do Bacalhau (MIVb)
- Formação das Argilas de Forno do Tijolo (MIVa)
- Formação dos Calcários de Entrecampos ("Banco Real")(MIII)
- Formação das Areolas de Estefânia (MII)

Anexo 6: Edifícios classificados na classe de patologias I, evidenciando a presença de fissuras. A. Rua do Benfornoso, nº93-99; B. Largo do Trigueiro, nº2-5; C. Calçadinha de São Miguel, nº32; D. Calçadinha de São Miguel, nº34 (destaque para as setas com direcção aproximada do ponto cardinal Norte).



Anexo 7: Edifícios classificados na classe de patologias II, evidenciando a presença de reboco em desagregação. A. Calçada de São Francisco, nº39; B. Calçadinha de São Lourenço, nº2-6; C e D. Largo de Santo Estêvão, nº2-7 (destaque para as setas com a direcção aproximada do ponto cardinal Norte).



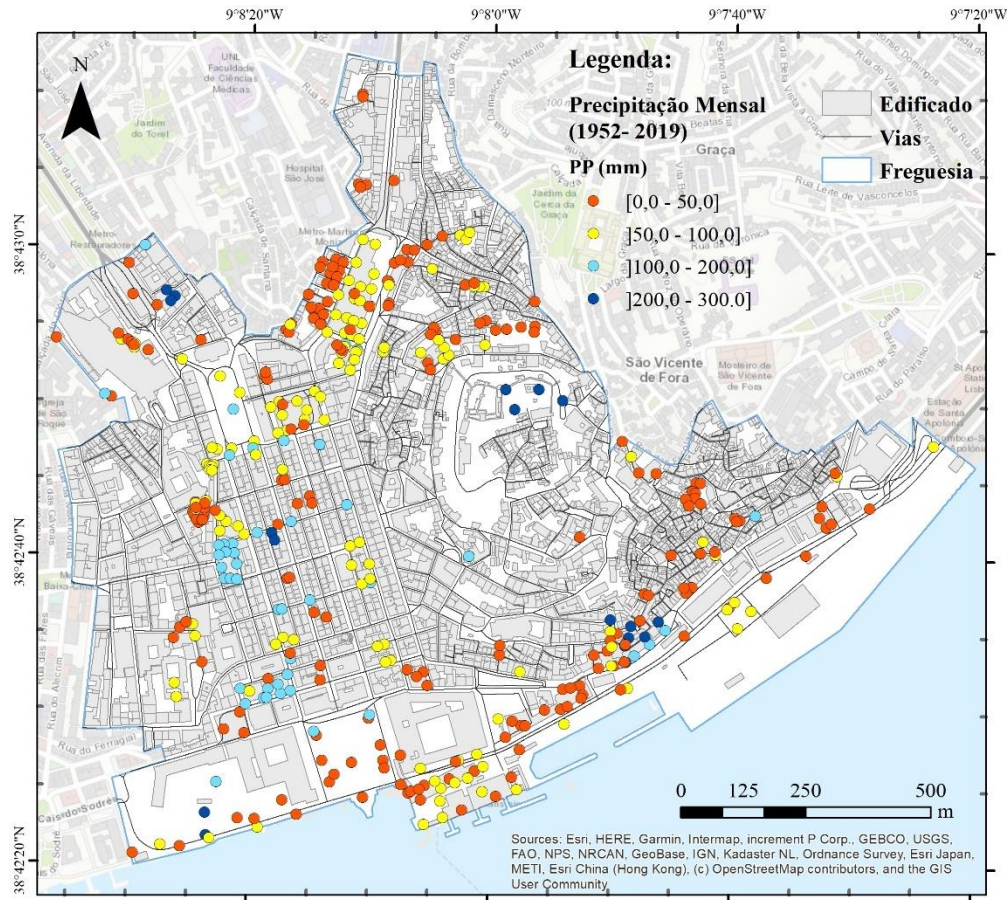
Anexo 8: Edifícios classificados na classe de patologias II, evidenciando a presença de fendas. A. Vila do Castelo, nº1-7; B. Rua da Achada, nº2-4; C. Beco das Canas, nº3-5 (destaque para as setas com a direcção aproximada do ponto cardinal Norte).



Anexo 9: Edifícios classificados na classe de patologias III, evidenciando a presença de desagregação do material de alvenaria. A. Largo do Trigueiro, nº13; B. Beco das Flores, nº23-25; C. Beco dos Fróis, nº1-7 (destaque para as setas com a direcção



Anexo 10: Distribuição dos valores de precipitação mensal acumulada (mm) registrados na altura da realização das medições dos níveis de água, divisão nas quatro classes de precipitação consideradas.



Anexo 11: Distribuição dos valores de peso específico natural das formações geológicas da área de estudo.

