



Padrão de deformação de movimentos de vertente em áreas periurbanas

Landslide deformation patterns in peri-urban areas

Sérgio C. OLIVEIRA¹, José L. ZÊZERE², Ricardo A.C. GARCIA³, Susana PEREIRA³

¹ Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, cruzdeoliveira@campus.ul.pt

² Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, zezere@campus.ul.pt

³ Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, rgarcia@campus.ul.pt

⁴ Centro de Estudos Geográficos, IGOT, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, susana-pereira@campus.ul.pt

Resumo: A ocorrência de movimentos de vertente desencadeados por eventos de precipitação intensa de curta duração ou de precipitação persistente e prolongada têm-se traduzido em consideráveis prejuízos materiais na região a norte de Lisboa, relacionados com a afetação/destruição total ou parcial de infraestruturas, em particular de vias de comunicação e edifícios. Este facto adquire particular relevância nas áreas periurbanas, como é o caso da Bacia do Rio Grande da Pipa, face ao potencial de crescimento que resulta da sua proximidade à cidade de Lisboa. De forma exploratória, este estudo permitiu avaliar o padrão de danos em edifícios e estradas, tendo por base: a resistência do elemento exposto, a intensidade do movimento de vertente e a relação espacial entre o elemento afetado e os diferentes sectores do movimento de vertente. No caso dos edifícios a escassez de dados não permitiu tirar ilações significativas. No caso das estradas, podem ser inferidos três padrões de deformação, distintos pela forma como se relacionam com o sector do movimento que origina os danos. Quando o movimento está localizado acima da via o grau de perda registado foi negligenciável. Nos casos em que as estradas se localizam no corpo o grau de perda foi ligeiro a significativo. Nos casos em que as estradas foram afetadas pela cicatriz ou flanco do movimento o grau de perda foi muito diversificado e dependente do desnível vertical aí existente.

Palavras-chave: Movimentos de vertente, vulnerabilidade, padrões de deformação, edifícios, estradas, bacia do Rio Grande da Pipa.

Abstract: The occurrence of landslides triggered by intense or long-lasting rainfall events in the region north of Lisbon has produced considerable material losses related with the partial or full destruction of infrastructures, in particularly roads and buildings. This problem becomes more relevant in the peri-urban areas as it is the case of the Grande da Pipa River basin that registered a potential growth resulting from the proximity of the Lisbon city. As an exploratory approach, this study allowed to evaluate the damage pattern in buildings and roads as consequence of landslides occurrence. To achieve that goal the following topics were considered: the resistance of the exposed element, the intensity of the landslide, and the spatial relationship between the exposed element and the different sectors of the landslide that affect it. For buildings the lack of data did not allow to define any deformation pattern. In the case of roads three different deformation patterns can be inferred by the way roads relate with the landslide sector which originates the damage. When the landslide rupture surface is located above the road the damage level registered was negligible. When the road is located within the landslide area the degree of loss registered increased (slight loss or significant). When the road is affected by a landslide scarp or landslide flank, variable degrees of loss were observed which appear to be dependent on the vertical steps existing in the landslide scarp or flanks.

Keywords: Landslides, vulnerability, deformation pattern, buildings, roads, Grande da Pipa River basin

1. Introdução e enquadramento da área de estudo

Na região a norte de Lisboa, a ocorrência de movimentos de vertente associada a eventos de precipitação intensa ou prolongada têm-se traduzido em consideráveis prejuízos materiais relacionados com a afetação/destruição total ou parcial de estruturas, em particular de vias de comunicação e edifícios. Este facto adquire particular relevância nas áreas periurbanas face ao potencial de crescimento que resulta, neste caso em concreto, da proximidade à cidade de Lisboa e da menor artificialização do território na proporção de solo urbano/rural. No contexto regional, sobressai, entre outras áreas periurbanas com elevada predisposição para a ocorrência de movimentos de vertente, a bacia do Rio Grande da Pipa (RGP), com 110 km², distribuídos pelos concelhos de Alenquer, Arruda dos Vinhos, Sobral de Monte Agraço e Vila Franca de Xira. Nesta bacia estão inventariados mais de 1400 movimentos de vertente (Figura 1), dos quais, aproximadamente um terço (425 casos) afetaram diretamente estruturas ou infraestruturas. A elevada predisposição local para a ocorrência de movimentos de vertente está intrinsecamente relacionada com a presença de um complexo de argilas e margas (margas de Abadia), de elevada impermeabilidade e plasticidade, que abrange quase 60 % da área de estudo, encimado por espessas bancadas de calcários corálicos compactos (calcários de Amaral) que localmente dão origem a cornijas de 10 a 20 m de altura e possibilitam a infiltração de água ao longo da rede de fracturação. A presença de declives moderados e vertentes anaclinais favorece a ocorrência de movimentos de vertente do tipo deslizamento rotacional (Oliveira, 2012). Relativamente ao edificado, e fora dos principais aglomerados populacionais, o concelho de Arruda dos Vinhos, fortemente representado na bacia do RGP, surge como o segundo concelho da Região do Oeste e Vale do Tejo com uma maior percentagem (cerca de 16%) de território classificado como área de edificação dispersa (Rego *et al.*, 2008).

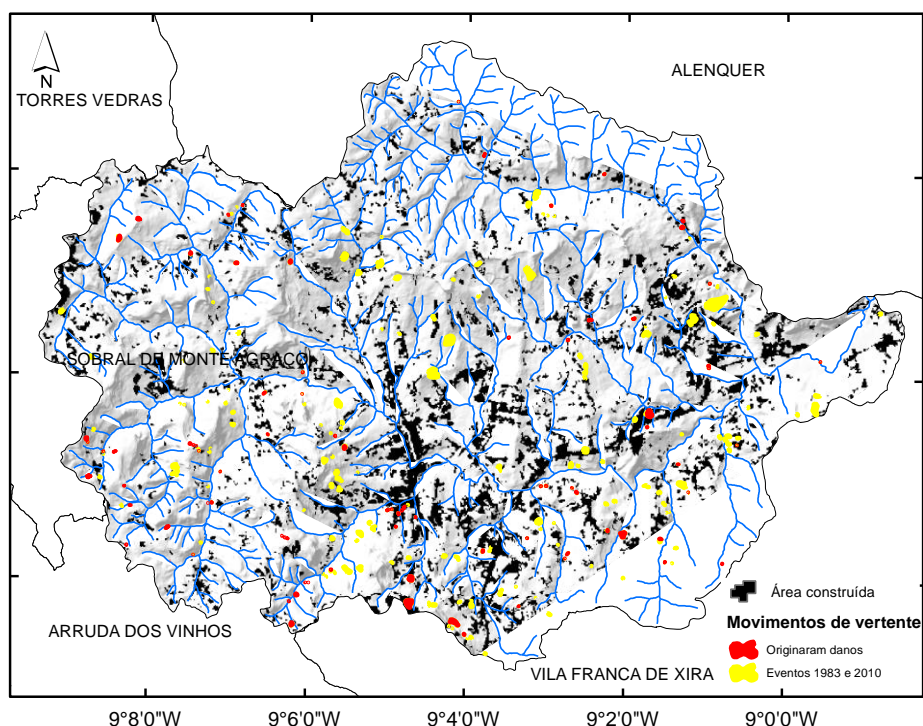


Figura 1 – Distribuição dos movimentos de vertente ocorridos nos eventos de 1983 e 2009/2010 (a amarelo) e destes os que originaram danos em estradas e edifícios (a vermelho). Área construída - CORINE Land Cover built-up areas 2006.

O presente trabalho procura, de forma exploratória, estabelecer a relação causa-efeito entre movimentos de vertente e o padrão de danos nos elementos expostos, tendo por base dois inventários de movimentos de vertente produzidos por eventos verificados em 1983 (associado a precipitações intensas e de curta duração) e em 2009/2010 (associado a precipitações prolongadas). Para o efeito serão consideradas: (i) as condições críticas de precipitação que geram a instabilidade regional; (ii) o padrão espacial, tipologia,

magnitude, atividade dos movimentos de vertente e a forma como a massa instabilizada afeta o elemento exposto; e (iii) a resistência estrutural estimada do elemento afetado.

2. Caracterização dos eventos de instabilidade de 1983 e 2010

Neste estudo foram apenas considerados os movimentos de vertente que geraram danos em edifícios e estradas na bacia do RGP em dois eventos de instabilidade desencadeados pelos dois tipos de condições críticas de precipitação que têm gerado movimentos de vertente na região norte de Lisboa nas últimas décadas. Para o efeito foram considerados: (i) o evento de 18 de novembro de 1983, associado a precipitações intensas de curta duração (118 mm/24 h, período de retorno (PR) = 194 anos, Zêzere e Trigo, 2011). Neste evento registou-se a ocorrência de 220 movimentos de vertente, que afetaram uma área de 161.413 m² (0,14% da área de estudo). Os movimentos de vertente são quase exclusivamente do tipo deslizamento, e em particular do tipo deslizamento rotacional. Neste evento apenas se registaram 37 deslizamentos rotacionais profundos (com superfície de rotura a profundidades superiores a 1,5 m) (Oliveira, 2012); (ii) o evento do outono/inverno de 2009/2010 ocorreu associado a precipitações persistentes e prolongadas. Zêzere e Trigo (2011) estabelecem dois limiares para a ocorrência de movimentos de vertente, o de 14 de janeiro de 2010 (332 mm /30 dias, PR = 6 anos) e o de 9 de março de 2010 (632 mm / 90 dias, PR = 8 anos). Na área de estudo as primeiras manifestações de instabilidade surgiram no final de novembro de 2009, tendo-se prolongado até finais de abril de 2010 (Oliveira, 2012). No total foram registados 254 movimentos de vertente, que afetaram uma área de 511.820 m² (0,45 % da área de estudo). Neste evento ocorreram essencialmente deslizamentos rotacionais (178 casos), dos quais 55 são profundos e abrangem cerca de dois terços da área instabilizada no evento (331988 m²), 0,30 % da área de estudo (Oliveira, 2012).

3. Metodologia

Neste trabalho e à semelhança de um vasto conjunto de trabalhos de referência considera-se que: (i) a vulnerabilidade, do ponto de vista físico traduz o “grau de perda” que um elemento ou conjunto de elementos expostos ao risco podem sofrer, considerando um movimento de vertente de uma determinada magnitude e expressa-se numa escala entre 0 (sem danos) e 1 (perda total do elemento); (ii) o nível de danos estruturais ou não-estruturais está amplamente dependente da resistência do elemento afetado; (iii) a posição do elemento afetado dentro da massa deslizada condiciona o potencial de vulnerabilidade; (iv) o nível de danos pode ser referenciado de forma qualitativa para a determinação de padrões de deformação.

A resistência estrutural de edifícios e estradas (Quadro 1) está fundamentalmente relacionada com a tipologia de construção sendo esta definida tipicamente em 4 níveis no caso dos edifícios e estradas, em que a resistência aumenta progressivamente no sentido do nível 4 (E4, V4).

As diferentes relações espaciais entre elementos expostos (edifícios e estradas) e os diferentes sectores internos dos deslizamentos (tipo de movimento de vertente predominante em ambos os eventos de instabilidade) encontram-se esquematizados na Figura 2. No Quadro 2, são descritos os critérios para a atribuição qualitativa do grau de perda em função dos danos verificados nos elementos expostos. Para efeitos da análise do grau de perda, será utilizado apenas o valor máximo de vulnerabilidade definido para cada uma das cinco classes (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1). Este tipo de classificação incorpora ainda duas situações distintas considerando os mecanismos físicos potenciadores de danos em infraestruturas e estruturas (Quadro 2): as situações de rotura /deformação (B1, B2, B3 e R2, R3) e as situações de soterramento ou pressões laterais/frontais (B4 e R1). No caso das situações de rotura consideram-se análogas aos casos B1 e R3 os desníveis verticais existentes nos flancos dos deslizamentos na área de depleção. A análise efetuada ao padrão de danos verificado em edifícios e estradas na bacia do RGP nestes dois eventos de instabilidade é expressa graficamente pela relação entre: a tipologia de edifício ou estrada que se pretende diretamente relacionável com a sua resistência estrutural, a área do movimento de vertente, utilizada neste estudo como proxy da intensidade do movimento de vertente e a relação espacial entre o elemento afetado e os diferentes sectores do movimento de vertente.

Quadro 1 – Tipologia de infraestruturas: edifícios e estradas (Adaptado de Garcia, 2012)

ID	Tipologia de Edifícios	ID	Tipologia de Estradas
E4	Edifícios com elementos resistentes de betão	V4	Autoestrada
E3	Edifícios com paredes de alvenaria argamassada	V3	Estrada nacional (asfaltada)
E2	Edifícios com pedra de adobe ou taipa	V2	Estrada municipal ou similar, desde que asfaltada
E1	Edifícios com outros elementos resistentes (madeira, metal)	V1	Estrada rural (terra batida ou outros materiais menos resistentes)

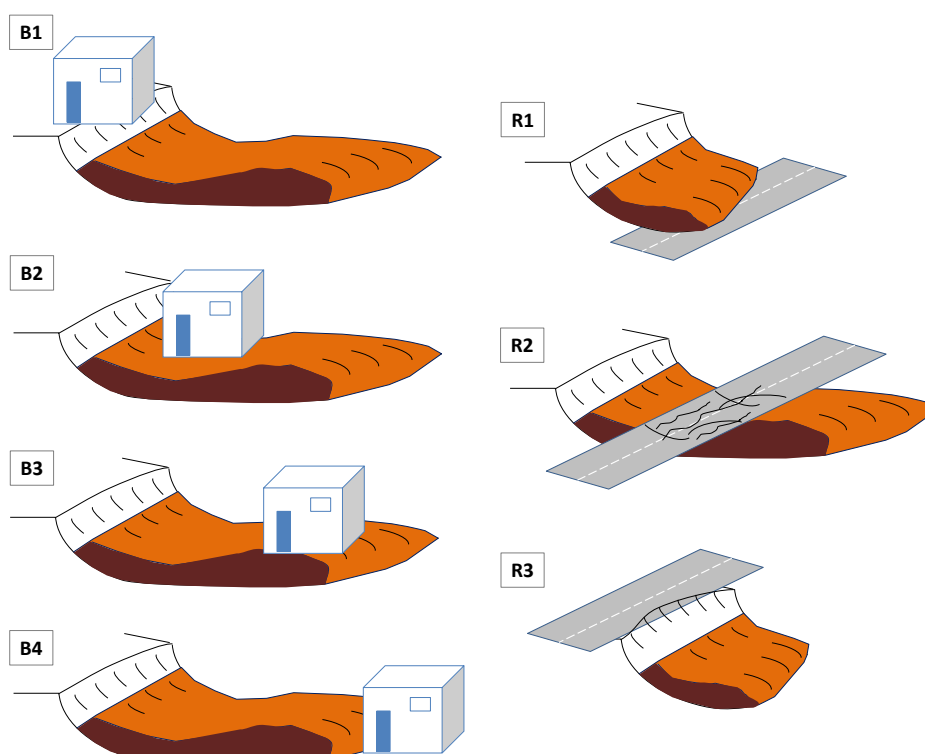


Figura 2 – Tipologia de localização de edifícios e estradas em função dos diferentes sectores internos dos deslizamentos: cicatriz (B1, R3), área de depleção (B2), área de acumulação (B3, R1), corpo do deslizamento (R2) e frente do deslizamento (B4).

Quadro 2 – Nível e tipologia de danos em edifícios e estradas (Adaptado de: Garcia, 2012; Guillard-Gonçalves et al., 2015)

Nível de danos --- Grau de perda	Tipologia de danos			
	Edifícios		Estradas	
	Situação de rotura ou deformação	Situação de soterramento	Situações de rotura ou deformação	Situação de soterramento
D1 Negligenciável Danos estéticos [0; 0,2]	Deformação superficial de cobertura (reboco), fissuras sem abertura ou desnível lateral	Acumulação de material até 0,5m de altura	Pequena deformação do pavimento; fendas de tração sem deslocamento vertical. Não afeta a estrutura	Acumulação de material <0,5m. Praticamente não interrompe a circulação.
D2 Ligeiro Danos menores]0,2; 0,4]	Queda de estuque, fissuras pequenas ou com desnível lateral, danos em portas e janelas.	Acumulação de material entre 0,5m e 2m de altura.	Pequenas fraturas com desnível, deformação da via. Danos que afetam a estrutura mas não impedem a circulação.	Acumulação de material entre 0,5m e 2m. Interrupção da circulação de média duração.
D3 Significativo Danos importantes / estruturais]0,4; 0,6]	Deslocamento ou colapso parcial de paredes ou painéis. Não compromete a integridade estrutural, fissuras muito desenvolvidas. Reparação complexa.	Acumulação de material com altura superior a 2m.	Fraturas ou deformações que danificam a estrutura da via. Restabelecimento da circulação relativamente expedito. Roturas a afetar apenas a berma da estrada.	Acumulação de material > 2m. Interrupção da circulação de longa duração.
D4 Severo Danos estruturais]0,6; 0,8]	Deslocamento ou colapso de alvenarias, queda parcial de pisos, fissuração grave ou colapso de secções da estrutura devido a assentamentos. Pode afetar a estabilidade do edifício.		Danos que <u>afetam gravemente parte da via</u> (fraturas, abatimentos, deformação do piso). O restabelecimento total da circulação só é possível mediante intervenção complexa e demorada. Pode originar o abandono da via ou circulação alternada.	
D5 Muito severo Danos estruturais]0,8; 1]	Danos que comprometem gravemente a integridade estrutural: colapso parcial ou total do edifício. Inclinação do edifício impeditiva da sua funcionalidade		Danos que <u>afetam gravemente a totalidade da via</u> (fraturas, abatimentos, deformação do piso). O restabelecimento da circulação só é possível mediante intervenção complexa e demorada. Pode originar o abandono da via.	

4. Resultados

Do total dos 474 movimentos de vertente ocorridos na bacia do RGP nos eventos de instabilidade de 1983 (220 casos) e de 2009/2010 (254 casos) aproximadamente 17 % (82 casos, Figura 1) provocaram algum tipo de dano em edifícios e estradas (rurais e alcatroadas). Estes 82 movimentos de vertente são praticamente todos do tipo deslizamento (rotacional e translacional) com exceção de seis casos (quatro tombamentos e duas escoadas de detritos). Na desagregação dos casos em que se registaram danos, por evento de instabilidade, a grande maioria (68,3 %, 56 casos) está associada ao evento de instabilidade de 2010. Destes, praticamente metade (27 casos) correspondem a deslizamentos rotacionais com profundidade da superfície de rotura superior a 1,5 m. Os restantes movimentos de vertente que geraram danos (31,7%, 26 casos) estão associados ao evento de instabilidade de 1983. Nestes, os mais frequentes foram os deslizamentos translacionais e rotacionais, superficiais (superfície de rotura até 1,5m de profundidade) ocorridos em taludes antrópicos (14 casos).

Em relação aos danos registados nas diferentes tipologias de edifícios durante os dois eventos de instabilidade (Figura 3) não é possível determinar com rigor um padrão de deformação considerando as diferentes relações espaciais definidas na Figura 2, uma vez que o número de ocorrências registadas é bastante reduzido (5 casos). Destes, quatro estão associados ao evento de 2010 e apenas um ao evento de 1983 (B1 (E3) grau de danos = 0,4). Com base nestes dados também não é possível estabelecer uma relação entre o grau de danos e a dimensão dos deslizamentos. Ainda assim, considerando as relações B1 e B3, e as tipologias de edifícios E3 e E4, o grau de danos mais elevado (acima de 0,8) apenas foi registado em deslizamentos com área acima de 2500 m². Na Figura 3, as duas fotografias à direita do gráfico ilustram os graus de danos máximos registados em edifícios de tipologia E3 (colapso parcial da estrutura) e E4 (inclinação do edifício) em função do desenvolvimento de cicatriz ou flanco abaixo do elemento exposto. No caso em que o edifício foi afetado pela frente do deslizamento (B4 (E4)), e por se tratar de um edifício com elementos resistentes de betão armado, os danos registados foram reduzidos, também em função de uma acumulação de material na frente do deslizamento inferior a 0,5m.

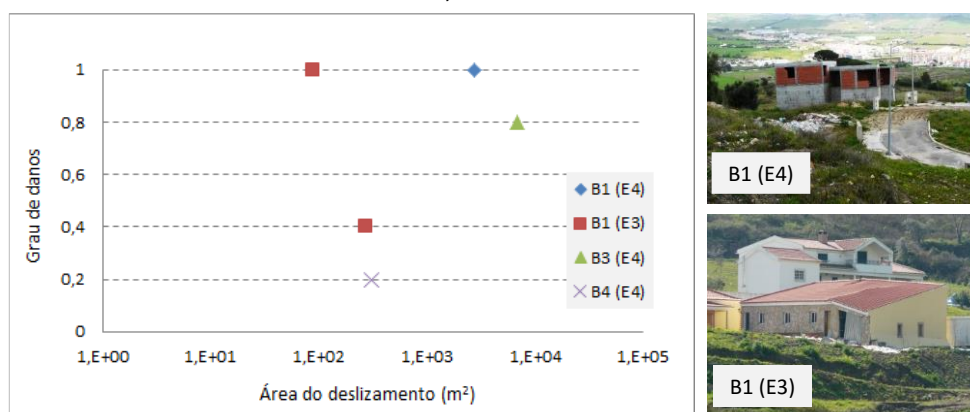


Figura 3 – Grau de danos registado em edifícios durante os eventos de instabilidade de 1983 e 2010 tendo em consideração a sua resistência estrutural e a posição do elemento afetado em relação aos diferentes sectores do movimento de vertente. À direita do gráfico representam o grau de danos mais elevado registado em edifícios.

No caso das estradas e independentemente da sua tipologia, se rurais (de terra ou materiais afins) ou alcatroadas (municipais, nacionais) e do evento de instabilidade, para a generalidade das situações em que os movimentos de vertente têm a superfície de rotura acima da cota da estrada (R1, Figura 2) predominam danos tipicamente de nível D1 (grau de perda até 0,2) decorrentes essencialmente da perda de funcionalidade da via por interrupção total ou parcial, originada pela acumulação de material deslizado que não excede 0,5 m de espessura. Apenas para três situações foi registada uma acumulação de material em cima da estrada até 2 m de espessura. No caso do deslizamento complexo (rotacional-translacional) das Cachoeiras a estrada esteve parcial ou totalmente interrompida de forma descontínua no tempo entre fevereiro de 2010 e abril de 2013 em resposta a sucessivos episódios de avanço da frente do deslizamento, não apresentando, contudo, danos estruturais. Nas situações em que a estrada ou caminho se encontram dentro da área deslizada (exemplo R2, Figura 2), registaram-se níveis de danos consistentemente mais elevados face ao verificado em R1. No caso das estradas rurais os danos registados oscilaram entre 0,4 e 0,6 o que traduz situações de ocorrência de fraturas e deformação de pavimento, cujo deslocamento horizontal, mas sobretudo o vertical, não impede totalmente a circulação ou permite o seu restabelecimento relativamente expedito. Com base nestes dados não é possível determinar especificamente uma relação clara entre o grau de danos e a dimensão dos deslizamentos e a intensidade do fenómeno desencadeante, uma vez que não se verificam padrões de danos diferentes entre inventários. No caso das estradas alcatroadas o grau de danos registado nos três deslizamentos é de 0,6. Nestes, apesar da deformação e fraturas afetarem a estrutura da via, estas permitiriam o restabelecimento da circulação, ainda que com piso provisório, ao fim de sete dias. Ainda assim, e tendo consciência que se verificaram danos em apenas 3 casos, o padrão de danos parece-nos consistente (0,6) para situações em que os deslizamentos apresentam uma dimensão entre 1000 e 10.000 m².

Relativamente à situação R2 importa ainda ressaltar que não foram registados danos em vias alcatroadas em movimentos de vertente com área inferior a 1.000 m² por oposição às vias rurais onde os danos foram registados em movimentos com área uma ordem de grandeza abaixo (100 m²). Este facto parece estar relacionado, por um lado, com a própria largura da via, inferior no caso das estradas rurais e, por outro, com a intensidade do fenómeno que desencadeou o evento de instabilidade. Os deslizamentos que afetaram as estradas alcatroadas são tipicamente maiores e mais profundos e ocorreram durante o evento de 2010, enquanto os deslizamentos que afetaram as estradas rurais são tipicamente de menor dimensão e mais superficiais e, na maioria, foram desencadeados durante o evento de 1983.

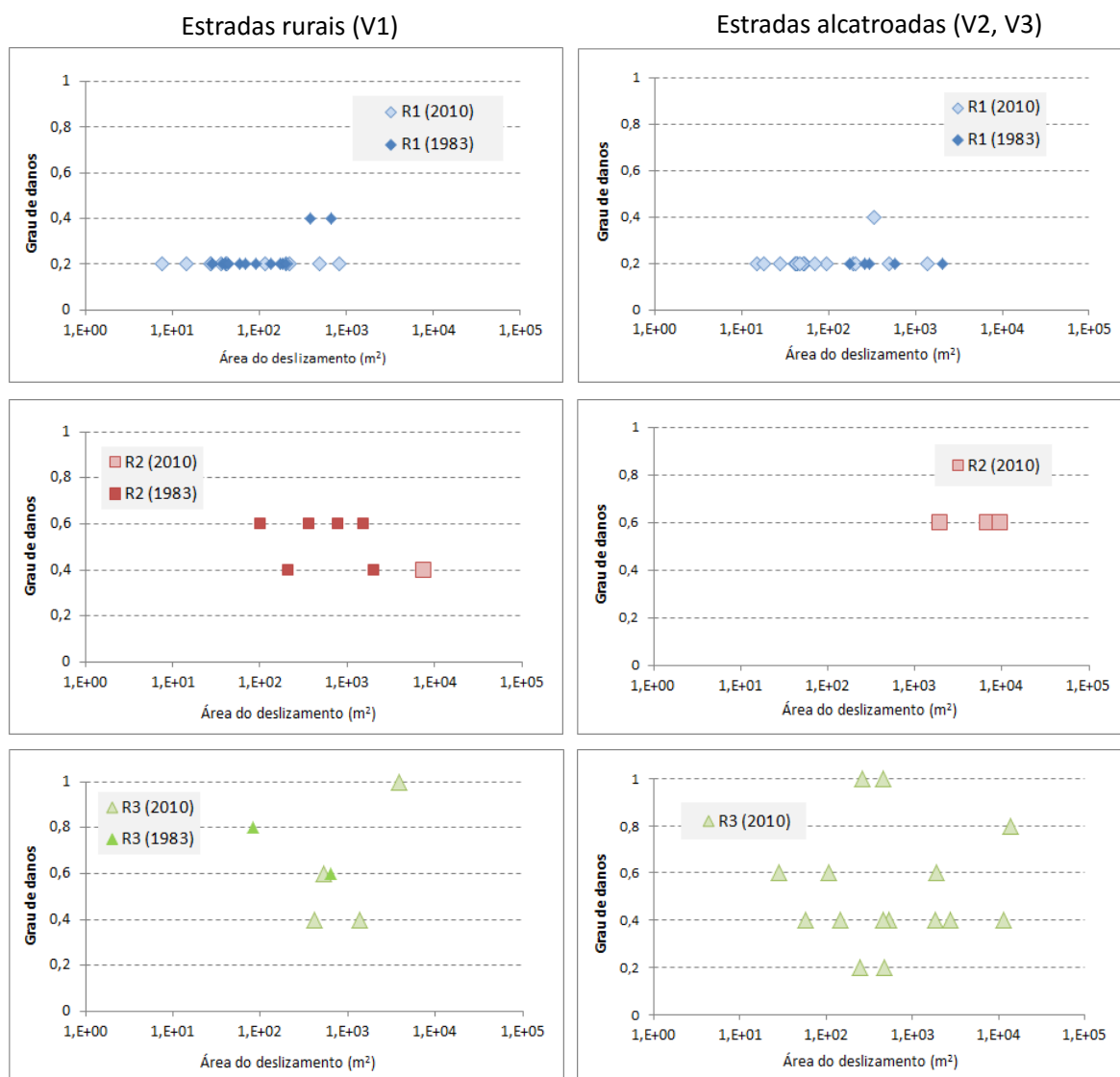


Figura 4 – Grau de danos registado em estradas rurais e alcatroadas durante os eventos de instabilidade de 1983 e 2010 tendo em consideração a sua resistência estrutural e a posição do elemento afetado em relação aos diferentes sectores do movimento de vertente.

Considerando a relação R3 (Figura 2), é interessante verificar que a grande maioria dos registos efetuados, independentemente se em estradas rurais ou estradas alcatroadas, está associada ao evento de instabilidade de 2010, com movimentos de maior profundidade. Apenas dois casos registados em estradas rurais se reportam ao evento de 1983. Quanto ao padrão de deformação verificado nas estradas rurais e alcatroadas ele é bastante diversificado, tendo sido registadas desde situações em que os danos nas estradas não passaram de pequenas deformações do pavimento ou o aparecimento de fendas de tração, sem deslocamento vertical, até situações em que se verificaram fraturas, abatimentos e deformação do piso, que afetaram gravemente a via e em que o restabelecimento da via só foi possível mediante intervenção

complexa e demorada. Relativamente à relação entre a dimensão dos deslizamentos que originaram os danos e o grau de danos a eles associados, para situações em que a cicatriz se desenvolve em parte da via não é possível determinar um padrão específico. Na área de estudo o grau de deformação verificado nestes casos está muito dependente do desnível vertical existente entre o sector da estrada fora da área deslizada (coroa) e a cabeça do deslizamento (faixa de contato entre o material deslocado e a cicatriz principal) ou o flanco do deslizamento.

5. Conclusões

A ocorrência de movimentos de vertente desencadeados por eventos de precipitação intensa de curta duração ou de precipitação persistente e prolongada na bacia do Rio Grande da Pipa permitiu a avaliação exploratória do padrão de danos em edifícios e estradas, tendo por base a resistência do elemento exposto, a intensidade do movimento de vertente e a relação espacial entre o elemento afetado e os diferentes sectores do movimentos de vertente. No caso dos edifícios, a escassez de dados não permitiu tirar ilações definitivas. No caso das estradas, podem ser inferidos três padrões de deformação distintos, pela forma como se relacionam com o sector do movimento que origina os danos. Nas situações R1, registou-se um grau de dano no elemento negligenciável (0,2) decorrente da perda de funcionalidade da via por interrupção total ou parcial, originada pela acumulação de material deslizado, mas sem necessidade de qualquer reparação estrutural. No caso R2 os danos registados são consistentemente mais elevados do que em R1 (grau de perda entre 0,4 e 0,6). Em R3 o registo do grau de perda cruzou todas as classes, independentemente da intensidade do movimento de vertente, estando dependente do desnível vertical existente entre a coroa e a cabeça do deslizamento ou os flancos do deslizamento, podendo originar, em casos de maior desnível, danos severos ou muito severos.

Agradecimentos

Este trabalho é financiado pela FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia e está enquadrado no âmbito do projeto FORLAND. S. Oliveira e S. Pereira são financiados por bolsas de Pós-Doutoramento, com as referências SFRH/BPD/85827/2012 e SFRH/BPD/69002/2010, respetivamente, pela Fundação para a Ciência e para a Tecnologia (FCT).

Referências Bibliográficas

- Garcia, R.A.C. (2012) *Metodologias para a avaliação do risco a movimentos de vertente. Aplicação na bacia do rio Alenquer*. Tese de Doutoramento. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
- Guillard-Gonçalves, C., Zêzere, J.L., Pereira, S., Garcia, R.A.C. (2016) Assessment of physical vulnerability of buildings and analysis of landslides risk at the municipal scale: application to the Loures municipality, Portugal. *Nat. Hazards earth Syst. Sci.*, 16, 311-331.
- Oliveira, S.M.C. (2012) *Incidência Espacial e Temporal da Instabilidade Geomorfológica na Bacia do Rio Grande da Pipa (Arruda dos Vinhos)*. Tese de Doutoramento. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.
- Rego, J.S., Pereira, L.I., Domingues, R., Carmo, H. (2008) Padrões de Ocupação do Solo, Diagnóstico Estratégico/Visão, Plano Regional de Ordenamento do Território do Oeste e Vale do Tejo, PROT-OVT, Documento de trabalho. CCDR-LVT.
- Zêzere, J. L.; Trigo, R. M. (2011) - Impacts of the North Atlantic Oscillation on landslides in Vicente-Serrano, S. M.; Trigo, R. M. (Eds.) Hydrological, Socioeconomic and Ecological Impacts of the North Atlantic Oscillation in the Mediterranean Region. *Advances in Global Change Research* 46. Springer Science+Business Media B.V.: 199 – 212.