CARTAS DE PERIGOSIDADE GEOLÓGICA DA ZONA HISTÓRICA DO PORTO

FACULDADE DE CIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Dezembro de 2007

CARTAS DE PERIGOSIDADE GEOLÓGICA DA ZONA HISTÓRICA DO PORTO

1. Introdução

Foi solicitada pela Câmara Municipal do Porto ao Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto a colaboração na elaboração de cartas de perigosidade geológica da Zona Histórica do Porto. Esta colaboração ocorre no âmbito do Projecto GEORISK "Risques Géologiques, Patrimoine et Système d'Information Géographique", sub-projecto inserido no projecto internacional "NOÉ – Patrimoines et prévention des risques naturels", INTERREG III C.

Trata-se de zona densamente povoada, com edifícios antigos, em geral degradados, que se encontra entre a Rua da Restauração, a Noroeste, e a Ponte Maria Pia, a Este. É limitada a Norte, na sua maior largura, pela zona em que se encontra o Hospital de Santo António, estreitando para Este e Oeste. A Sul encontrase o Rio Douro.

A zona estudada inclui uma área de escarpas abruptas, em especial entre as Pontes Luiz I e Maria Pia, e áreas de declive mais suave, em que ocorrem afloramentos rochosos de volume mais reduzido, formando pequenos taludes.

O maciço rochoso encontra-se intensamente fracturado e com grau de alteração muito variável. A presente Notícia Explicativa refere-se às cartas de perigosidade elaboradas a partir do estudo da sismicidade, da estrutura e grau de alteração do maciço e da avaliação da amplificação das ondas sísmicas no terreno em função da sua litologia.

2. Dados existentes e elementos recolhidos

O maciço rochoso em que está fundada a cidade do Porto tem sido alvo de estudos geológico-geotécnicos com finalidades diversas, em especial relativas a importantes obras de engenharia que se têm realizado nos últimos anos.

Tem-se mostrado de grande interesse e utilidade a Carta Geotécnica à escala 1:10.000, composta por um conjunto de cartas de factores e uma carta de síntese, com aplicação no estudo desenvolvido. Existe ainda a Carta Geológica de Portugal, folha 9C - Porto, à escala 1:50.000, que se encontra em fase de actualização.

Para a cartografia agora realizada foi utilizada como base a carta topográfica à escala 1:2.000.

Os elementos recolhidos incluem a pesquisa de ocorrências histórias, em especial ao longo da escarpa, e as análises de dados de sismicidade histórica e instrumental. Foram também analisados *logs* de sondagem.

Para avaliação da perigosidade de ocorrência de quedas ou deslizamento de blocos rochosos, foram utilizados os dados existentes sobre as principais famílias de diaclases, que condicionam a estabilidade dos taludes rochosos, alvo de trabalhos desenvolvidos na Faculdade de Ciências da U.P.

3. Geomorfologia e geologia

De acordo com a Carta Militar de Portugal 122 do Instituto Geográfico do Exército (1999), verifica-se que a área estudada apresenta um relevo vigoroso, com declives abruptos, em especial no que se refere ao talude que constitui a margem direita do rio Douro, entre a Ponte Luíz I e a Ponte Maria Pia. Existem ainda elevações bem marcadas como aquela em que se situa a Sé do Porto (cota 77), o edifício da antiga Cadeia da Relação e o Hospital de Santo António (cota 69). O Centro Histórico situase numa área de cotas baixas, que variam entre 9 e 24, alongando-se paralelamente ao rio (Figura 1). Existe alguma coincidência entre os principais edifícios históricos e o relevo, verificando-se que alguns deles estão construídos em elevações de pequena área onde aflora granito são a alterado.

O rio Douro corre num vale estreito, de vertentes íngremes e elevadas, que resultou da escavação pelas águas de uma zona de fractura de origem hercínica e de uma descida eustática, com o consequente encaixe do leito do rio.



Figura 1 - Excerto da Carta Geomorfológica à escala 1:10.000, incluída na Carta Geotécnica do Porto.

A cidade do Porto está construída sobre um maciço granítico constituído por "granito de grão médio ou médio a fino", designado por granito do Porto (Figura 2).

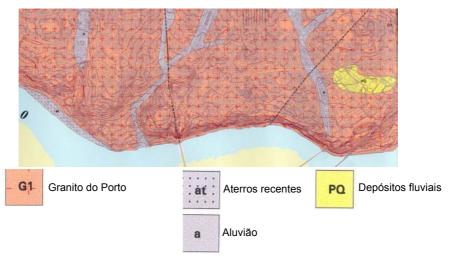


Figura 2 - Excerto da Carta Geológica à escala 1:10.000, incluída na Carta Geotécnica do Porto.

O maciço granítico encontra-se intensamente alterado, verificando-se variações abruptas do grau de alteração, tanto em profundidade como em planta. A alteração varia de W_1 a W_5 (ISRM, 1981) (Tabela 1), ocorrendo ainda solo residual granítico em alguns locais.

Tabela 1 – Estados de alteração (ISRM, 1981).

Símbolo	Designação	Descrição
W ₁	São	Não ocorrem sinais visíveis de meteorização
W ₂	Pouco alterado	Meteorização ao longo das descontinuidades e também da
		rocha, com descoloração do maciço
W ₃	Medianamente	Menos de metade da rocha encontra-se decomposta e/ou
	alterado	desintegrada para solo. Rocha sã ou descolorada está
		presente no maciço
W ₄	Muito alterado	Mais de metade da rocha encontra-se decomposta e/ou
		desintegrada para solo. Rocha sã ou descolorada está
		presente no maciço
W ₅	Decomposto	A rocha está decomposta ou desintegrada para solo. A
		estrutura da rocha original está bem preservada

Este maciço está também intensamente fracturado (F₁ a F₅, ISRM, 1981), (Tabela 2) havendo três famílias predominantes de descontinuidades – duas subverticais e uma subhorizontal – nas quais se observa circulação de água e que, visivelmente, condicionaram a alteração do maciço.

A análise da estabilidade de taludes rochosos pelo Teste de Markland permitiu concluir que é previsível a ocorrência de deslizamento de blocos rochosos ao longo das diaclases ou da sua intersecção. Exceptuam-se os afloramentos de pequena altura em que, apesar de existir possibilidade de ocorrência de instabilidade, a probabilidade é desprezável pela dimensão apresentada.

Na área em estudo existem depósitos aluvionares ao longo de linhas de água profundas de direcção predominante N-S e aterros recentes junto ao leito do rio Douro, no local em que se encontra a Alfândega do Porto, edifício de grande porte.

Intervalo (cm)	Símbolos	Designação
>200	F ₁	Muito afastadas
60-200	F ₂	Afastadas
20-60	F ₃	Medianamente afastadas
6-20	F ₄	Próximas
<6	F ₅	Muito próximas

Tabela 2 – Espaçamento das descontinuidades (ISRM, 1981).

A percolação de água no interior do maciço verifica-se ao longo das diaclases (Figura 3), facto bem evidente na escarpa junto ao rio Douro, em que se observam frequentes escorrências de água.

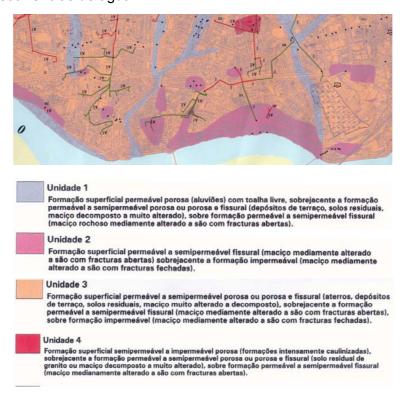


Figura 3 - Excerto da Carta Hidrogeológica à escala 1:10.000, incluída na Carta Geotécnica do Porto.

A drenagem superficial ocorre essencialmente segundo as linhas de água orientadas N-S, e no sentido de Norte para Sul, ou seja, para o rio Douro.

4. Sismicidade

A cidade do Porto situa-se no Norte do País, numa zona considerada de intensidade VI segundo a Escala de Mercalli Modificada, no zonamento macrossísmico de Portugal previsto no Eurocódigo 8 (em preparação) (Figura 4).

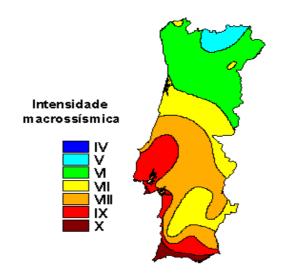


Figura 4 – Intensidade macrossísmica em Portugal Continental.

Este zonamento foi realizado com base nos dados de sismicidade histórica e instrumental, sendo que o sismo de maior magnitude registado em Portugal continental é o sismo de 1755.

5. Carta de perigosidade sísmica

A perigosidade sísmica regional está relacionada com a sismotectónica, existindo registos históricos e instrumentais de epicentros intra e inter-placa.

Foi utilizado como base de zonamento sísmico o que consta da versão preliminar do Eurocódigo 8 para Portugal Continental, para uma acção sísmica próxima, por se considerar ser esta a situação mais gravosa, e um período de retorno de 475 anos. Segundo este zonamento, a cidade do Porto insere-se na Zona 3, com uma aceleração média de 80 cm/s². Os espectros de resposta fornecem a indicação de uma aceleração máxima de cerca de 130 cm/s² para uma acção sísmica afastada (Zona 5) e de 200 cm/s², para uma acção sísmica próxima (Zona 3).

A perigosidade sísmica local resulta de acelerações cujas características são modificadas pelo contexto geológico e topográfico local e pelos efeitos induzidos, como a liquefacção e os movimentos de terreno.

O estudo da vulnerabilidade local refere-se à análise de zonas em que podem produzir-se efeitos de sítio ou movimentos de terreno. O levantamento de ocorrências históricas confirmou que o sismo de 1755 foi o de maior intensidade na cidade do Porto. Os principais efeitos foram verificados nas estruturas que se situam nos pontos mais altos como a Sé e a Cadeia da Relação. O microzonamento foi, então, realizado considerando as particularidades mecânicas das formações geológicas e a topografia.

5.1. Zonas susceptíveis de efeito de sítio

Em alguns locais da zona histórica do Porto pode ocorrer efeito da amplificação de energia sísmica o que pode conduzir a um agravamento da intensidade sísmica de base registada para a zona do Porto. Esta amplificação é devida à reologia dos materiais (litologia e grau de alteração) e à topografia.

Os dados considerados foram:

- Levantamento topográfico por foto-restituição à escala 1:2.000
- A cartografia geológica à escala 1:10.000
- A cartografia geotécnica à escala 1:10.000
- Zonamento previsível e respectiva aceleração, de acordo com Eurocódigo 8.

5.1.1. Efeito de sítio litológico

A carta de perigosidade sísmica teve por base um conjunto e informações previamente disponíveis sob a forma de cartografia geotécnica, elementos topográficos e algumas medições efectuadas sobre as várias formações geotécnicas. A carta geotécnica do Porto foi actualizada recorrendo a novos elementos entretanto compilados e também recorrendo a algumas observações de campo. Após estas correcções as formações foram traduzidas em termos do módulo de distorção empregando a fórmula:

$$G_0 = V_S * \rho$$

Na fórmula \mathbf{Vs} corresponde à velocidade de propagação das ondas S (ondas de corte ou transversais) e ρ corresponde à densidade. Os valores de velocidade de ondas de corte (\mathbf{Vs}) foram obtidos a partir de dados de sísmica de refracção empregando para tal geofones horizontais. No entanto alguns valores foram já obtidos

através de análise de ondas dispersivas em dados colhidos para o efeito. Os valores foram agrupados em classes de distorção as quais estão expressas na escala.

A carta que resultou e que está patente na Figura 5 justifica, de forma quantitativa, a maior ou menor rigidez das formações superficiais, propriedade esta que governa a resposta local quando solicitado a uma acção sísmica. Esta propriedade constitui um dos factores mais influentes de amplificação e que contribui assim para o chamado efeito de sítio.

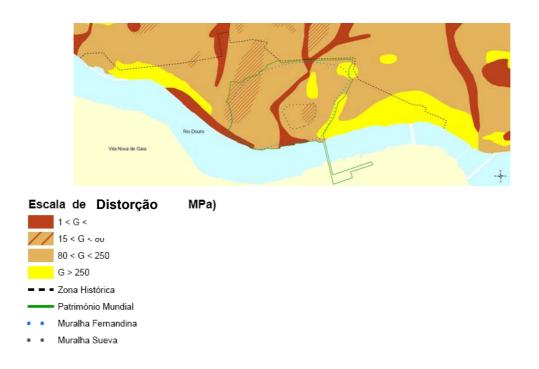


Figura 5 - Carta de módulo de distorção dinâmico expresso em MPa (Carta nº 1).

A partir da carta anterior é possível estimar a intensidade sísmica na escala de Mercalli empregando a formula (Marçot e Arnal, 2004):

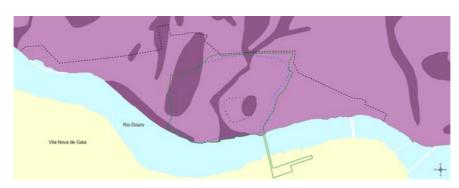
Incr.=
$$[3.3\log(0.8*Sn)+7]$$
- $[3.3\log(0.8)+7]$

Esta fórmula expressa os incrementos de intensidade sísmica em função do tipo e formação (Sn) e em função de um valor e base de aceleração sísmica (0,8 m.s⁻²) e obtido a partir da nova zonografia sísmica patente no Eurocódigo 8 para Portugal. As formações Sn são classificadas de acordo com a seguinte tabela:

Tabela 3 – Efeito de sítio devido ao tipo de solo

Tipo	Factor	Tipo de solo
S0	1,0	Granito são a ligeiramente alterado
S1	1,2	Granito alterado
S2	1,4	Solo residual granítico
S3	1,6	Aluvião
S4	1,7	Aterros recentes

As formações apresentadas na carta anterior (Figura 5) foram classificadas e agrupadas de acordo com os dados da Tabela 3. Após a atribuição do respectivo factor a considerar, foi possível calcular cada incremento, calculado como anteriormente exemplificado e esse valor foi adicionado ao valor de intensidade de base cartografado para a cidade do Porto na carta de intensidade sísmica nacional (Eurocódigo 8) o qual corresponde a um valor de 6 na escala de Mercalli. Desta forma resultou a carta patente na Figura 6.







- - Zona Histórica

Património Mundial

Muralha Fernandina

Muralha Sueva

Figura 6 - Carta de módulo de intensidade sísmica inferida e expressa na escala de Mercalli (Carta nº 2)

A partir da carta da figura 1 é também possível estimar a aceleração sísmica recorrendo à fórmula (Marçot e Arnal, 2004):

Esta fórmula expressa a aceleração sísmica em função do tipo de formação (Sn) e em função de um valor de base de aceleração sísmica (80 cm.s⁻²). As formações foram classificadas de acordo com a seguinte tabela (Tabela 4):

Tabela 4 - Efeito de sítio devido ao tipo de solo

Tipo	Factor	Tipo de solo
S0	1,0	Granito são a ligeiramente alterado
S1	1,2	Granito alterado
S2	1,4	Solo residual granítico
S3	1,6	Aluvião
S4	1,7	Aterros recentes

As formações da carta patente na figura 1 foram classificadas de acordo com a tabela 4 Após este cálculo resultou a carta patente na figura 7.

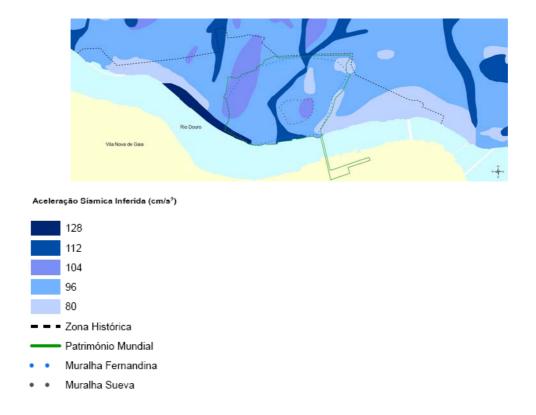


Figura 7 - Carta de aceleração sísmica inferida e expressa em cm/s² (Carta nº 3)

As figuras 6 e 7 correspondem a duas cartas que resultam por si só em cartas com informação quantitativa mas baseadas em fórmulas empíricas. Estas cartas

correspondem a estimativas de intensidade e aceleração baseadas no estado da arte actual mas não são modelos físicos determinísticos. Por outro lado, os efeitos que poderão reflectir em termos da acção de um sismo, correspondente a um evento com período de retorno de 475 anos, não contemplam os efeitos induzidos dependentes de outros factores. Carecem assim do factor topográfico e presença de intervenção antrópica sob a forma de taludes de escavação.

5.1.2. Efeito de sítio topográfico

Sendo assim vimos necessidade de integrar elementos característicos da morfologia do Porto os quais são particularmente influentes em termos de efeitos secundários da acção de um sismo ou por vezes denominados por efeitos induzidos.

Um dos factores que consideramos foi o declive do terreno o qual foi agrupado em quatro classes (Tabela 5). A cada uma destas classes correspondem factores multiplicativos que incrementarão ou não os efeitos à resposta sísmica e a qual é dependente, essencialmente, do tipo de solo. Esse incremento percentual (p. ex. 1,2: 20%), muito naturalmente, será devido à maior ou menor instabilidade dos terrenos assentes em zonas mais ou menos inclinadas. Esta carta (Figura 8) afectada dos factores da tabela 5 foi operada de forma multiplicativa em GIS com a carta da figura 5 e seus respectivos factores.

Tabela 5 - Factores de inclinação

Factor	Inclinação
1,0	0° a 15°
1,2	15° a 30°
1,4	30° a 45°
1,6	> 45°



Figura 8 - Carta de inclinação topográfica e expressa em graus (Carta nº 4)

Seguidamente foram compilados os taludes de natureza antrópica aos quais foi considerado um factor de agravamento de 20% ou seja foram classificados com um factor multiplicativo de 1,2 e com uma zona de *buffer* de 7,5m em torno do talude correspondente a uma área de influência de danos do talude acidentado. Esta carta foi também operada de forma multiplicativa com a carta que resultou do passo anteriomente descrito para a carta de declives (carta de distorção x carta de declives).

Verificou-se na prática que o efeito de cristas, ou algumas elevações topográficas, provocam também um efeito de amplificação da energia sísmica. Se observamos a morfologia da zona de estudo, patente na figura 9 e na carta de declives da figura 8, podemos prever a existência de uma zona de crista quando se transita da zona mais inclinada, próxima do rio, para a zona de planalto da cidade do Porto. Essa transição corresponde a uma cota média de 50m. Desta forma foi desenhado um *buffer* gradual, centralizado na curva de nível dos 50m. Este *buffer*, patente nas figuras 9 e 10, exibe factores que vão de 0 a 0,4 mas os quais são agora aditivos. A razão do emprego de uma operação aditiva em vez de multiplicativa reside no facto de já existir uma componente topográfica que por si só já incrementou amplificação. Este efeito é assim um efeito adicional que não incrementa em demasiado o efeito topográfico de base.

A operação aditiva do efeito de crista topográfica sobre a carta que resultou do passo anteriormente descrito para a carta de taludes (carta de distorção x carta de declives x carta de taludes) permitiu obter a carta de Perigosidade sísmica com efeitos

directos e induzidos (Figura 11). Efeito directo porque contempla a aceleração do solo e induzido porque contempla a instabilidade característica de cada local em termos topográficos e de instabilidades de taludes.

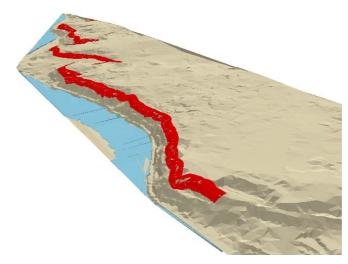


Figura 9 - Perspectiva tridimensional da área de estudo com um *buffer* centrado nos 50m



Figura 10 - Buffer desenhado para a curva de nível 50m



Figura 11 - Carta de Perigosidade Sísmica (Carta nº 6)

5.3 Cartografia de Avaliação de Efeito Sísmico

A carta anterior resulta assim como a carta fundamental para se poder avaliar o risco sísmico da área descrita. No entanto houve necessidade de combinar o máximo de informação possível e a qual fosse expressável em termos de aceleração. Desta forma foi elaborado uma cartografia que teve por base, mais uma vez, a carta de distorção e uma carta hipsométrica. Sobre esta última, ela foi separada em intervalos de elevação e às zonas correspondentes às áreas mais elevadas foram atribuídos factores amplificativos maiores. O resultado desta operação ((Accel=Sn*80 cm.s⁻²) x carta de hipsometria) está patente na figura 12. A esta carta foi atribuído o nome de carta de Carta de Avaliação do Efeito Sísmico uma vez que corresponde a uma forma quantitativa, em termos de aceleração, prevista e imposta ao edificado. Esta carta é semelhante à carta já apresentada já anteriormente na figura 7 mas como já referido apresenta a contribuição da topografia sobre este parâmetro.

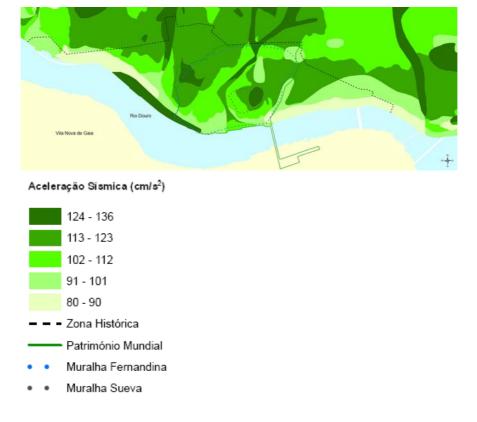


Figura 12 - Carta de Avaliação do Efeito Sísmico (Carta nº 5)

A análise de instabilidade potencial dos taludes rochosos foi realizada segundo o Teste de Markland, considerando as hipóteses possíveis de deslizamento de massas ou queda de blocos:

- Deslizamento planar;
- Deslizamento em cunha, resultante da intersecção de duas famílias de descontinuidades;
 - Queda de blocos por toppling.

Este teste baseia-se no levantamento exaustivo das diaclases que cortam o maciço, visíveis em cada talude, e no seu tratamento estatístico para definição das principais famílias de descontinuidades que caracterizam o maciço rochoso.

Atendendo a que algumas destas famílias apresentam uma pequena abertura e mostram, por vezes, indícios de circulação de água, foi considerado um valor para o ângulo de atrito de 30°.

Os resultados desta análise foram combinados com os dados sobre a altura dos taludes, dado que alguns destes taludes, em especial junto ao rio Douro, apresentam altura da ordem da dezena de metros.

Assim, foi considerada perigosidade alta para os taludes altos (cerca de 30 m), nos quais o teste de Markland indicava probabilidade de rotura em cunha ou planar, baixa a média, para os taludes altos (cerca de 30 m) em que a análise realizada indicava a probabilidade de tombamento e para taludes baixos ou médios (cerca de 10 m) e em que o teste de Markland indicava rotura em cunha ou planar, e nula a baixa para os taludes de altura inferior a 10 m ou com ausência de movimentos.

Como resultado obteve-se a Carta de Perigosidade de Instabilidade de Taludes (Figura 13).



Figura 13 - Carta de Perigosidade de Instabilidade de Taludes (Carta nº 7)

O culminar da cartografia de risco efectuada sobre a Carta de Perigosidade Sísmica, patente na figura 11, encontra-se na figura 14. Esta carta combinou de forma multiplicativa os factores da carta anteriormente descrita com os da Carta de Vulnerabilidade do Património (Carta nº 13, da responsabilidade da Direcção Municipal de Cultura da Câmara Municipal do Porto e do Instituto Português do Património Arquitectónico) e implementados de forma matricial. A matriz de risco utilizada encontra-se representada na figura 15.

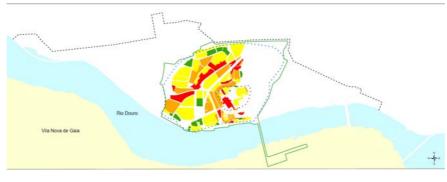




Figura 14 - Carta de Risco Sísmico (Carta nº 14)

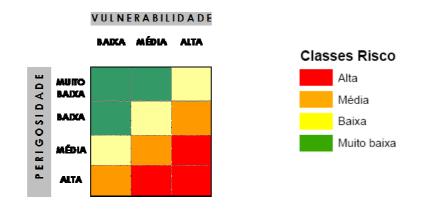


Figura 15 - Matriz de Risco Sísmico

Por fim foi possível comparar o resultado em termos de efeitos sísmicos directos e induzidos, figura 11, com a carta de ocorrências da figura 16 (Carta nº8). Constatou-se, de forma independente, que há de facto uma concentração das ocorrências segundo zonas e alinhamentos com as anomalias patentes na Carta nº 6 (Figura 11).



Figura 16 - Carta de Ocorrências (Carta nº 8)

As operações que conduziram às cartas escritas estão resumidas no esquema da figura 17 a qual apresenta a relação entre algumas das principais cartas descritas.

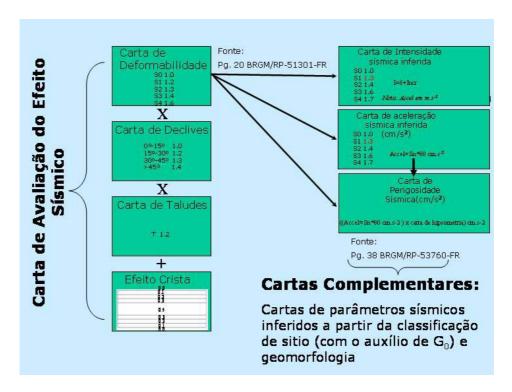


Figura 17 - Esquema da relação entre algumas das cartas de parâmetros obtidas

Bibliografia

BRGM (?) Méthodologie de réalisation du scénario – Projet GE.RI.A – Phase 3. Gestion des risques naturels, Interreg 1999-2001. Rapport BRGM RP51301

Eurocódigo 8, Disposição para o projecto de estruturas sismo-resistentes, em preparação.

Carta Geotécnica do Porto, escala 1:10 000, 2003. Câmara Municipal do Porto.

COBA/ FCUP/ CMP (2003) - Carta Geotécnica do Porto. Notícia explicativa.

N. Marçot, C. Arnal (2004) – Méthodologie de réalisation d'un scénario de séisme sur la ville de Mulhouse (68). Rapport BRGM RP52760