

VIBRAÇÕES INDUZIDAS EM EDIFÍCIOS SENSÍVEIS DEVIDAS AO TRÁFEGO RODOVIÁRIO

SANDRA MARISA DA COSTA SOARES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor António Manuel Barbot Campos e Matos

Co-Orientador: Professor Doutor Rui Artur Bártolo Calçada

JUNHO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A meus Pais

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano”

Sir Isaac Newton

AGRADECIMENTOS

Uma vez terminado o presente trabalho gostaria de exprimir os meus sinceros agradecimentos às pessoas que permitiram que a sua concretização. Não apenas aos que tiveram directamente envoltos na sua realização, mas também àqueles que me acompanharam ao longo deste percurso académico.

Agradeço nomeadamente:

- Ao Professor António Manuel Campos e Matos, pela sua disponibilidade, pelos conhecimentos transmitidos, pela preocupação e apoio.
- Ao Professor Rui Bártolo Calçada, pelo acompanhamento e diponibilidade, pelas observações inteligíveis que permitiram instruir uma perspectiva alternativa sobre todos os conceitos envoltos no estudo elaborado. Agradeço ainda a amabilidade de me facultar os dados imprescindíveis para a quantificação da acção dinâmica.
- Ao Engenheiro Hugo Marques, pela disponibilidade e pelos documentos fornecidos.
- Ao Engenheiro Nuno Santos, pela gentileza prestada face os obstáculos encontrados no programa Ansys, pela disponibilidade e paciência. Agradeço ainda os gráficos elaborados com recurso ao Matlab, sem os quais não poderia confrontar as velocidades obtidas com os critérios genéricos de vibração.

Gostaria de agradecer ainda ao Professor Adalberto França e ao Professor Pedro Costa pela informação e documentos fornecidos.

Agradeço ainda a todos os Professores que fizeram parte do meu processo de aprendizagem, pelas aprovações e apreensões, pelos ensinamentos, pela força aplicada no momento certo, pela consolidação de conhecimentos e pelas tensões por vezes exercidas, que permitiram chegar até aqui. A todos eles um Muito Obrigado.

Finalmente queria agradecer a todos os meus amigos e família que tornaram toda esta caminhada dotado de momentos inesquecíveis. Por tudo o que são, por tudo o que me transmitiram, pela constante presença, pela amizade e pelo suporte.

RESUMO

A nanotecnologia é um campo das ciências aplicadas, dedicado ao controle e manipulação de matéria com uma escala menor que um micrómetro. É no seu âmbito que surge o desenvolvimento e uso de dispositivos, cujos componentes são dependentes de efeitos electrónicos, podendo mesmo implicar a manipulação individual de átomos. Um exemplo ao qual este tipo de tecnologia se reporta é o caso da indústria de produção de chips, cujos equipamentos podem ser cerca de cem vezes mais sensíveis do que os utilizados num edifício corrente. A título de curiosidade, o processo para formar um circuito integrado completo envolve uma técnica designada por fotolitografia, cuja viabilidade total do processo pode ser afectada em grande escala por problemas relativos a vibrações e ruídos. É neste contexto que surge o item fulcral no qual este estudo se vai incidir, isto é a indução de vibrações de baixa frequência em edifícios sensíveis.

Usualmente um edifício de investigação científica altamente sensível a micro vibrações é caracterizado por ser constituído por laboratórios providos com diversos instrumentos e equipamentos sensíveis a vibrações e ruídos ambientais, requerendo consequentemente medidas de mitigação que permitam a condução natural das tarefas laborais, por forma a não serem prejudicadas por factores externos. No âmbito de cumprir o objectivo principal da dissertação, foi recriado um modelo 2D, de um edifício sensível, cuja principal fonte de impacto vibratório é determinada pelo tráfego rodoviário que se sucede numa via localizada nas suas proximidades. Posteriormente, através do estudo do modo de propagação das ondas induzidas até ao local receptor predefinido, foi intuito deste trabalho determinar a velocidade de chegada destas ondas aos laboratórios, averiguando se estas cumpriam os critérios genéricos de vibração aplicáveis de acordo com a tipologia de actividade prevista para cada laboratório.

No âmbito da presente dissertação, pretendeu-se igualmente inferir sobre a influência das irregularidades existentes nos pavimentos na propagação das vibrações, através da criação de três cenários alternativos. Fez-se ainda variar o número de veículos a circular, avaliando a forma como o aumento da solicitação actuava sobre as vibrações que se faziam sentir ao nível dos laboratórios.

Este estudo foi comportado através de uma modelação numérica, com recurso ao software de análise estrutural Ansys, que facultou a determinação do modo de propagação das ondas induzidas pelo tráfego rodoviário, através do solo e até à estrutura onde se encontram implantados os laboratórios.

Numa primeira fase são destacados alguns conceitos teóricos, fundamentais para a compreensão dos princípios segundo os quais é baseado o modelo elaborado. Estes mesmos permitem entender a metodologia de cálculo utilizada pelo programa, facultando assim uma melhor percepção dos resultados obtidos.

Numa segunda fase, foi efectuada a modelação numérica em 2D e o estudo do comportamento dinâmico dos dois sub-sistemas solo/ estrutura face a presença de vibrações rodoviárias. Durante este ponto foram levadas a cabo algumas simplificações que tornam o modelo susceptível de ser analisado, com o intuito de aproxima-lo com um caso real. Foi igualmente propósito deste estudo, desenvolver uma crítica construtiva da modelização face ao que realmente poderia ocorrer na realidade, avaliando ainda possíveis disparidades de valores obtidos para as velocidades.

PALAVRAS-CHAVE: vibração induzida de baixa frequência, tráfego rodoviário, edifícios sensíveis, análise numérica.

ABSTRACT

Nanotechnology is a branch of applied sciences that studies the control and manipulation of matter on an atomic and molecular scale. In this perspective rises up the develop and use of electronic devices capable of individual atomic manipulations. The industry of chips production is just one of the many examples using equipments up to 100 times more sensitive than the ones used in a normal building. As a curiosity, the process of making a full integrated circuit involves a technique named fotolitography which can be widely affected by noise and vibration problems. In this context, urges the essential item that is focused in this study, the induction of low frequency vibrations in sensitive buildings.

Usually a scientific research building, highly susceptible to micro vibrations, is characterized by having in its laboratories a wide range of instruments and equipments sensitive to vibrations and environmental noises, requiring because of that mitigation measures to allow the correct execution of the labor tasks and avoid influence of external factors. To achieve the main objective of this thesis it has been done a 2D model of a sensitive building, which main noise source comes from the car traffic of a nearby road. A test to certificate if the waves fulfilled the requirements of the generic applicable vibrations in the labor activities performed by each lab was done by studying the way of propagation of the waves from the source to the destiny.

It was also a goal of this thesis to determine the influence of the existing irregularities in the pavement to the propagation to the waves by using 3 alternative scenarios. Besides that the number of vehicles circulating was also a variable of the model correlating the increase of solicitation and the levels of vibrations in the laboratories.

This was a study completely based on a numeric model, using the structural analysis software Ansys, that conducted the propagation of waves from the traffic through the soil until the final structure where the labs were implemented.

In the first phase some of the fundamental theoretical concepts, necessary for the comprehension of the principles behind the model, are highlighted. These are the structural concepts used on the calculations done by the program and allow us to understand better the results.

In the second phase, the 2D numerical modulation was performed and the study of the dynamic behavior of both sub-systems (soil/structure) facing traffic vibrations was calculated. In this step some simplifications were done, allowing the case to be analyzed and make it more similar to a real case. Was also one of the objectives in this study, to develop a constructive criticism in the modulation used facing what can really happen in reality, evaluating possible disparities of values on the velocities obtained.

KEYWORDS: low frequency induced vibration, road traffic, sensitive buildings, numeric analysis

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO

1

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2. OBJECTIVOS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO EM CAPÍTULOS	3

2. ESTADO DE ARTE

5

2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR TRÁFEGO RODOVIÁRIO EM EDIFÍCIOS SENSÍVEIS.....	6
2.2.1.MECANISMO DE EXCITAÇÃO.....	6
2.2.2.PROPAGAÇÃO DAS VIBRAÇÕES NO SOLO	9
2.2.3.RECEPTOR – ESTRUTURA.....	12
2.3. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO	13
2.4. CRITÉRIO GENÉRICO DE VIBRAÇÃO	15

3. BREVE DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO A ESTUDAR

17

3.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO SENSÍVEL	17
3.2. DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA	17
3.3. CRITÉRIOS GENÉRICOS DE VIBRAÇÃO.....	18

4. METODOLOGIA DE ANÁLISE.....

21

4.1. INTRODUÇÃO	21
4.2. SISTEMAS ELÁSTICOS VS SISTEMAS INELÁSTICOS	23
4.3. MÉTODOS DE RESOLUÇÃO DO EQUILÍBRIO DINÂMICO.....	23
4.3.1. MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO DIRECTA – MÉTODO DE NEWMARK	24
4.3.2. MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO NUMÉRICA – SOBREPOSIÇÃO MODAL	25
4.3.2.1 Análise Modal	25
4.3.2.2 Sobreposição Modal.....	26

4.4. SISTEMAS AMORTECIDOS – AMORTECIMENTO DE RAYLEIGH	26
4.5. ACÇÃO DINÂMICA TRANSMITIDA PELO TRÁFEGO RODOVIÁRIO	28
4.6. CONDIÇÕES FRONTEIRA	30
4.7. DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO DO MODELO	33

5. MODELAÇÃO NUMÉRICA DO SISTEMA E QUANTIFICAÇÃO DA ACÇÃO DINÂMICA

5.1. INTRODUÇÃO	35
5.2. RECURSOS FACILITADOS PELO PROGRAMA ANSYS ELEITOS PARA A CONCEPÇÃO DO MODELO	35
5.3. PROPRIEDADES MATERIAIS ADOPTADAS PARA A GERAÇÃO DO MODELO	39
5.3.1. PARÂMETROS MECÂNICOS DO SOLO	39
5.3.2. PARÂMETROS MECÂNICOS DA ESTRUTURA PORTICADA	42
5.4. GEOMETRIA, MALHA E CONDIÇÕES FRONTEIRA	42
5.4.1. DIMENSÃO E TIPOLOGIA SELECIONADA PARA OS ELEMENTOS FINITOS	42
5.4.2. GEOMETRIA – SIMPLIFICAÇÕES	43
5.4.3. CONDIÇÕES FRONTEIRA	44
5.4.3.1 Definição das diferentes tipologias de fronteiras a implementar	44
5.4.3.2 Validação bidimensional das fronteiras radiantes	46
5.4.4. MODELO FINAL	47
5.5. ACÇÃO DINÂMICA	51
5.5.1. INTRODUÇÃO	51
5.5.2. PARÂMETROS INFLUENTES NA SOLICITAÇÃO DINÂMICA	52
5.5.2.1. Parâmetros relativos ao pavimento – irregularidades distribuídas	52
5.5.2.2. Parâmetros relativos aos veículos	54
5.5.3. DETERMINAÇÃO DA ACÇÃO DINÂMICA	56

6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

6.1. INTRODUÇÃO	59
6.2. PARÂMETROS A INTRODUIR NO ANSYS NA ANÁLISE TRANSITÓRIA	59
6.3. CENÁRIOS DE ANÁLISE	60
6.4. ANÁLISE DE RESULTADOS E RESPECTIVA CONFRONTAÇÃO COM OS CRITÉRIOS GENÉRICOS DE VIBRAÇÃO	61
6.4.1. COMPONENTE VERTICAL DA VELOCIDADE NO PISO 0	62

6.4.2. COMPONENTE HORIZONTAL DA VELOCIDADE NO PISO 0	91
6.4.3. COMPONENTE VERTICAL DA VELOCIDADE NO PISO 1.....	97
6.4.4. COMPONENTE HORIZONTAL DA VELOCIDADE NO PISO 1	97
6.5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	99

7. CONCLUSÕES

101

7.1. CONCLUSÕES GERAIS	101
------------------------------	-----

7.1. PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	104
--	-----

REFERÊNCIAS

105

ANEXO A1

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS DOS ESTRATOS ROCHA DECOMPOSTA E ROCHA ALTERADA A PARTIR DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO ENSAIO SPT

ANEXO A2

MACRO DESENVOLVIDA PARA A GERAÇÃO DO MODELO BIDIMENSIONAL

ANEXO A3

CONFRONTAÇÃO DOS GRÁFICOS DA VELOCIDADE QUADRÁTICA MÉDIA EM FUNÇÃO DE BANDAS DE 1/3 DE OITAVA DA FREQUÊNCIA COM OS CRITÉRIOS GENÉRICOS DE VIBRAÇÃO

ANEXO A4

ESQUEMA REPRESENTATIVO DO MODELO ADOPTADO

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.2.1 – O problema de interacção dinâmica estrada – solo – estrutura	5
Fig.2.2 – Amplificação dinâmica relativa ao deslocamento vertical do tabuleiro da ponte Deibuel medido pelo transdutor WG22 (adaptado de Cantieni (1992))	6
Fig.2.3 – Modelos dinâmicos e repartição do peso bruto de camiões: a) simples; b) articulado	7
Fig.2.4 – Modelo linear de um quarto de um veículo segundo (adaptado de Gillespie (1992)) – Modelo de massas suspensas (2GL).....	8
Fig.2.5 – Modo de propagação das ondas Rayleigh	10
Fig.2.6 – Modos de propagação das vibrações no solo	11
Fig.2.7 – Ilustração esquemática de uma trincheira vazia.....	13
Fig.2.8 – Isolamento de base – Sistema Passivo	14
Fig.2.9 – Atenuação provocada pelo comprimento médio das ondas para uma fundação de rigidez infinita na direcção de propagação da onda	15
Fig.2.10 – VC curves mais restritivas e limitações propostas pelas normas ISO.....	16
Fig.2.11 – VC curves	16
Fig.3.1 – Planta dos laboratórios e respectivo corte para a modelação 2D	19
Fig.4.1 – Significado físico do vector ε	22
Fig.4.2 – Lei da variação das acelerações no Método de Newmark	25
Fig.4.3 – Relação entre os coeficientes de amortecimento e as frequências para o amortecimento de Rayleigh.....	27
Fig.4.4 – Modelo de massas suspensas (2GL).....	29
Fig.4.5 – Modelo dinâmico de um camião do tipo articulado	30
Fig.4.6 – <i>Elementary boundaries</i> com deslocamento nulo	31
Fig.4.7 – Condição fronteira de um meio semi-infinito.....	31
Fig.4.8 – Amortecedor viscoso para uma barra elástica truncada em $x=L$	32
Fig.5.1 – BEM 3.....	37
Fig.5.2 – PLANE 183.....	37
Fig.5.3 – COMBIN14	38
Fig.5.4 – Amortecimento nodal num elemento de 8 nós (2D)	45
Fig.5.5 – Evolução temporal das tensões	46
Fig.5.6 – Modelo 2D – estratificação do solo	47
Fig.5.7 – Modelo 2D – pormenor da malha e estrutura porticada	48
Fig.5.8 – Modelo 2D – condição fronteira radiantes	48
Fig.5.9 – Modelo 2D – condição de simetria e de fronteira rígida	49

Fig.5.10 – Modelo 2D completo.....	49
Fig.5.11 – 1º e 2º modo de vibração	50
Fig.5.12 – 3º e 4º modo de vibração	50
Fig.5.13 – 5º e 6º modo de vibração	50
Fig.5.14 – 7º e 8º modo de vibração	50
Fig.5.15 – 9º e 10º modo de vibração	51
Fig.5.16 – Veículo deslocando-se ao longo de um perfil irregular	51
Fig.5.17 – Função densidade espectral de potência calculada com base nos valores médios de $G_d(\Omega_0)$ para diferentes classes de qualidade dos pavimentos rodoviários de acordo com a proposta da comissão ISO/TC 108.....	53
Fig.5.18 – Perfis de irregularidades gerados artificialmente para pavimentos de qualidade média, boa e muito boa	54
Fig.5.19 – Distribuição da massa por eixos do camião articulado	55
Fig.5.20 – Função beta de densidade de probabilidade da distância entre veículos em tráfego congestionado em função da velocidade	56
Fig.5.21 – Gráfico da acção dinâmica em função do tempo para um pavimento com nível de qualidade média	57
Fig.5.22 – Gráfico da acção dinâmica em função do tempo para um pavimento com nível de qualidade bom	58
Fig.5.23 – Gráfico da acção dinâmica em função do tempo para um pavimento com nível de qualidade muito bom	58
Fig.6.1 – Planta fictícia dos laboratórios do piso 0.....	61
Fig.6.2 – Gráfico da componente vertical da velocidade no domínio do tempo para o nó localizado a 71.4m (cenário 1).....	61
Fig.6.3 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 71.4m (cenário 1).....	62
Fig.6.4 - Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 75.0m (cenário 1).....	63
Fig.6.5 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 78.6m (cenário 1).....	63
Fig.6.6 - Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 82.2m (cenário 1).....	63
Fig.6.7 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 85.8m (cenário 1).....	64
Fig.6.8 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 89.1m (cenário 1).....	64
Fig.6.9 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 92.4m (cenário 1).....	64

Fig.6.10 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 95.7m (cenário 1).....	65
Fig.6.11 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 99.0m (cenário 1).....	65
Fig.6.12 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 102.3m (cenário 1)	65
Fig.6.13 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 105.6m (cenário 1)	66
Fig.6.14 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 108.9m (cenário 1)	66
Fig.6.15 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 112.2m (cenário 1)	66
Fig.6.16 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 115.5m (cenário 1)	67
Fig.6.17 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 118.8m (cenário 1)	67
Fig.6.18 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 71.4m (cenário 2).....	68
Fig.6.19 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 75.0m (cenário 2)	68
Fig.6.20 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 78.6m (cenário 2).....	69
Fig.6.21 - Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 82.2m (cenário 2).....	69
Fig.6.22 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 85.8m (cenário 2).....	69
Fig.6.23 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 89.1m (cenário 2).....	70
Fig.6.24 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 92.4m (cenário 2).....	70
Fig.6.25 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 95.7m (cenário 2).....	70
Fig.6.26 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 99.0m (cenário 2).....	71
Fig.6.27 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 102.3m (cenário 2)	71
Fig.6.28 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 105.6m (cenário 2)	71

Fig.6.29 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 108.9m (cenário 2)	72
Fig.6.30 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 112.2m (cenário 2)	72
Fig.6.31 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 115.5m (cenário 2)	72
Fig.6.32 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 118.8m (cenário 2)	73
Fig.6.33 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 71.4m (cenário 3)	74
Fig.6.34 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 75.0m (cenário 3)	74
Fig.6.35 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 78.6m (cenário 3)	74
Fig.6.36 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 82.2m (cenário 3)	75
Fig.6.37 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 85.8m (cenário 3)	75
Fig.6.38 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 89.1m (cenário 3)	75
Fig.6.39 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 92.4m (cenário 3)	76
Fig.6.40 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 95.7m (cenário 3)	76
Fig.6.41 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 99.0m (cenário 3)	76
Fig.6.42 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 102.3m (cenário 3)	77
Fig.6.43 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 105.6m (cenário 3)	77
Fig.6.44 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 108.9m (cenário 3)	77
Fig.6.45 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 112.2m (cenário 3)	78
Fig.6.46 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 115.5m (cenário 3)	78
Fig.6.47 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 118.8m (cenário 3)	78

Fig.6.48 – Gráficos da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 71.4m; cenário 4 vs cenário 1	79
Fig.6.49 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 92.4m; cenário 4 vs cenário 1	80
Fig.6.50 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 102.3m; cenário 4 vs cenário 1	80
Fig.6.51 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 112.2m; cenário 4 vs cenário 1	80
Fig.6.52 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 115.5m; cenário 4 vs cenário 1	81
Fig.6.53 – Velocidades <i>rms</i> para o cenário 1 e 4.....	82
Fig.6.54 – Velocidades máximas e mínimas para o cenário 1 e 4	82
Fig.6.55 – Gráficos da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 71.4m; cenário 5 vs cenário 2	83
Fig.6.56 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 92.4m; cenário 5 vs cenário 2	83
Fig.6.57 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 102.3m; cenário 5 vs cenário 2	84
Fig.6.58 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 112.2m; cenário 5 vs cenário 2	84
Fig.6.59 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 118.8m; cenário 5 vs cenário 2	84
Fig.6.60 – Velocidades máximas e mínimas para o cenário 2 e 5	85
Fig.6.61 – Velocidades quadráticas médias para o cenário 2 e 5	86
Fig.6.62 – Gráficos da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 71.4m; cenário 6 vs cenário 3	86
Fig.6.63 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 89.1m; cenário 6 vs cenário 3	87
Fig.6.64 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 102.3m; cenário 6 vs cenário 3	87
Fig.6.65 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 112.2m; cenário 5 vs cenário 2	87
Fig.6.66 – Gráfico da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o nó localizado a uma distância de 118.8m; cenário 6 vs cenário 3	88
Fig.6.67 – Velocidades máximas e mínimas para o cenário 3 e 6	88
Fig.6.68 – Velocidades quadráticas médias para o cenário 3 e 6	89
Fig.6.69 – Velocidades mínimas (componente vertical) obtidas para os diferentes cenários	90
Fig.6.70 – Velocidades máximas (componente vertical) obtidas para os diferentes cenários	90

Fig.6.71 – Velocidades quadráticas médias (componente vertical) obtidas para os diferentes cenários	91
Fig.6.72 – Velocidades máximas e mínimas (componente horizontal) obtidas para os cenários 1 e 4.....	93
Fig.6.73 – Velocidades máximas e mínimas (componente horizontal) obtidas para os cenários 2 e 5.....	93
Fig.6.74 – Velocidades máximas e mínimas (componente horizontal) obtidas para os cenários 3 e 6.....	94
Fig.6.75 – Velocidades quadráticas médias (componente horizontal) obtidas para os cenários 1 e 4.....	94
Fig.6.76 – Velocidades quadráticas médias (componente horizontal) obtidas para os cenários 2 e 5.....	95
Fig.6.77 – Velocidades quadráticas médias (componente horizontal) obtidas para os cenários 3 e 6.....	95
Fig.6.78 – Velocidades máximas (componente horizontal) obtidas para os diferentes cenários	96
Fig.6.79 – Velocidades mínimas (componente horizontal) obtidas para os diferentes cenários	96
Fig.6.80 – Velocidades quadráticas médias (componente horizontal) obtidas para os diferentes cenários	97
Fig.6.81 – 2º modo de vibração do sistema	98
Fig.6.82 – Gráficos da velocidade quadrática média vertical em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência para o 1º nó, do piso 1; cenário 1, 2, 3, 4, 5, 6.....	99

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Atenuação geométrica n	11
Quadro 2.2 – Factor α para o amortecimento material	11
Quadro 2.3 – Mudança no comportamento do solo com a deformação por corte e modelação correspondente (Ishihara, 1996)	12
Quadro 2.4 – Eficácia do recurso às trincheiras como medida de mitigação	14
Quadro 3.1 – Critérios genéricos de vibração a aplicar de acordo com o tipo de laboratório	19
Quadro 5.1 – Tipos de elementos facultados pelo programa ANSYS empregues no modelo elaborado.....	36
Quadro 5.2 – Correções a implementar ao valor N obtido pelo ensaio SPT que permitem a obtenção do ensaio corrigido e normalizado representado por $(N_1)_{60}$	40
Quadro 5.3 – Relação entre a densidade relativa com o coeficiente empírico utilizado na fórmula empírica de determinação do módulo cortante.....	41
Quadro 5.4 – Tabela-resumo dos parâmetros mecânicos das distintas camadas constituintes do solo	41
Quadro 5.5 – Parâmetros mecânicos do betão utilizado na concepção da estrutura porticada	42
Quadro 5.6 – Dimensão de cada elemento finito para elaboração da malha.....	43
Quadro 5.7 – Valores adoptados para a dimensão de cada elemento finito da malha.....	43
Quadro 5.8 – Geometria da estrutura porticada	43
Quadro 5.9 – Componentes tangenciais e normais do amortecimento referentes a cada camada do solo	45
Quadro 5.10 – Valores de $G_d(\Omega_0)$ para diferentes níveis de qualidade do pavimento de acordo com a proposta da comissão ISO/TC 108 (adaptado de Drosner e tal. (1989))	53
Quadro 6.1 – Cenários simulados.....	60
Quadro 6.2 – Valores r.m.s para a velocidade quando implementada uma trincheira vazia nas proximidades da fonte; % de diminuição da velocidade quadrática média após a aplicação desta medida.....	100
Quadro 7.1 – Quadro resumo do cumprimento dos critérios para os diferentes cenários	103

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$(N_1)_{60}$ - nº de pancadas do ensaio SPT – valor normalizado e corrigido.

$\{\ddot{u}\}$ - Vector das acelerações.

$\{\dot{u}\}$ - Vector das velocidades.

$G_d(\Omega)$ – Função densidade espectral de potência da irregularidade.

[C] – Matriz de amortecimento.

[D] – Matriz de elasticidade.

[K] – Matriz de rigidez da estrutura/ sistema.

[L] – Operador diferencial de compatibilidade.

[M] – Matriz de massa.

$\{u\}$ – Vector dos deslocamentos.

Δt – Intervalo de tempo.

A – Área.

b – dimensão da base de um elemento.

C_n – Amortecimento normal a um elemento.

c_p – Velocidade de propagação das ondas P.

c_s – Amortecimento da suspensão.

c_s – Velocidade de propagação das ondas S.

C_t – Amortecimento tangencial a um elemento.

DA – factor de amplificação dinâmica.

D_r – Densidade relativa.

E – Módulo de elasticidade.

$f_{m\acute{a}x}$ – Frequência máxima.

F_n – Forças exteriores.

G_0 – Módulo de distorção inicial.

$G_{m\acute{a}x}$ – Módulo de distorção máximo.

h – Dimensão da altura de um elemento.

I_D – Índice de compactidade.

I_{zz} – Inércia.

k_s – Rigidez da suspensão.

k_t – Rigidez vertical dos pneumáticos.

M_s – Massa amortecida.

m_u – Massa não amortecida; massa do veículo situada abaixo do sistema de suspensão (eixo, pneus, etc.).

n – Capacidade de atenuação geométrica.

N – nº de pancadas do ensaio SPT.

r – Distância da fonte ao receptor.

r_0 – Distância da fonte ao ponto de referência.

R_{dyn} – Resposta dinâmica.

R_{sta} – Resposta estática.

t – Tempo.

t_i – Instante de tempo i .

v_0 – Velocidade da partícula no local emissor.

v_s – Velocidade de propagação das ondas S.

W – Peso bruto.

W – Peso bruto.

w_n – Frequências naturais.

x – Posição relativa.

z_r – Deslocamento imposto pela estrada.

z_s – Deslocamento da massa amortecida.

z_u – Deslocamento da massa não amortecida.

α – Coeficiente de proporcionalidade da matriz de Massa com a matriz de Amortecimento

α – Factor de amortecimento material.

β – Coeficiente de proporcionalidade da matriz de Rigidez com a matriz de Amortecimento

β e γ – Parâmetros que controlam a estabilidade e precisão do processo de integração de Newmark.

γ – Peso Volúmico.

ε – Vector das deformações.

λ – Comprimento de onda.

v – Velocidade.

ρ – Massa Volúmica.

σ_x – Tensão segundo a direcção do eixo dos xx .

σ_{xy} – Tensão segundo o plano xy .

σ_{xz} – Tensão segundo o plano xz .

σ_y – Tensão segundo a direcção do eixo dos yy .

σ_{yz} – Tensão segundo o plano yz .

Φ_n – Modos de vibração.

Ω - Frequência espacial cíclica da irregularidade.

ν - Coeficiente de Poisson.

EMPA – Research Institute of the ETH Domain.

GL – Graus de Liberdade.

IEST – Institute of Environmental Sciences and Technology

ISO – International Standard Organization.

MEF – Método de Elementos Finitos.

SPT – Standard Penetration Test

VC – Vibration Criteria.

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Hoje em dia o bem-estar da sociedade tem-se tornado num factor preponderante e mesmo condicionante no desenvolvimento de alguns projectos, pelo que é cada vez mais prática comum recorrer a normas específicas no âmbito de proporcionar conforto no interior de determinados edifícios susceptíveis a perturbações. Esta quantificação dos distúrbios induzidos por fontes externas ou internas aos edifícios, é realizada através da análise dinâmica dos sistemas envolvidos, desde a fonte, ao caminho de propagação, até à estrutura receptora. No caso de determinados edifícios designados “especiais”, tais como hospitais e laboratórios de investigação, este factor torna-se mesmo decisivo para que o desempenho das actividades no seu interior ocorra sem risco de danificação dos produtos neles desenvolvidos. Actualmente, com a entrada da electrónica na era da nanotecnologia, os componentes electrónicos comportam-se de um modo diferente do convencional necessitando de controlos cada vez mais exigentes no que concerne às variações da temperatura e fundamentalmente no controlo de vibrações e ruídos.

É neste âmbito que a engenharia estrutural torna proeminente o estudo dinâmico das estruturas numa das muitas fases de dimensionamento de um projecto desta envergadura. Esta condicionante de projecto, predefinida de acordo com os critérios de genéricos de vibração, visa preconizar limitações a impor no projecto de edifícios dotados de equipamentos sensíveis. Apesar destas limitações não constituírem nenhuma norma, instituem uma boa recomendação caso os equipamentos sensíveis não facultem tal informação provinda do fabricante.

O cerne do problema envolto nas vibrações induzidas encontra-se obviamente na fonte que origina o fenómeno propriamente dito, pelo que se torna fulcral a sua predeterminação. As fontes de vibração que podem ser causa de tais perturbações subdividem-se em:

- i) internas: induzidas por equipamentos instalados, pessoas que caminham, tráfego interno, etc.
- ii) externas: tráfego rodoviário e ferroviário, vento, etc.

No caso em estudo, o tráfego rodoviário, nomeadamente o desenvolvido pelos veículos mais pesados, foi determinado como a fonte com maior impacte vibratório. Por seu turno, o estudo das excitações internas, induzidas pelas instalações que criam o ambiente propício ao desenvolvimento da nanotecnologia, apesar de muitas vezes serem motivo de preocupação, não foi contemplado neste trabalho visto envolver técnicas que não abrangem os objectivos propostos. Partiu-se portanto do princípio que equipamentos utilizados nas “cleanrooms”, tais como compressores, bombas, equipamentos de refrigeração, ventiladores, etc, com propensão a gerar vibrações e ruídos, se encontram isolados.

A vibração induzida por tráfego rodoviário comporta uma certa complexidade na sua modelação, nomeadamente na sua quantificação enquanto modelo de cargas uniformemente distribuídas que variam ao longo do tempo. Inicialmente foi elaborada uma pesquisa sobre os factores internos e externos aos veículos influentes e preponderantes na quantificação das forças que o permitem modelar. Assim tendo por base estudos elaborados por alguns autores, foi possível apreender o modo como estes podem ser recriados e posteriormente modelados.

Posteriormente à modelação da acção dinâmica foi necessário estudar o modo de obtenção de um modelo envolvendo o edifício “sensível” bem como todo o terreno envolto na propagação das vibrações. Consequentemente foi fundamental estudar a geometria do solo e do edifício e conhecer quais os parâmetros mecânicos inerentes a cada um dos materiais. Um dos factos que torna possível a concretização de tal análise passa pela implementação de condições fronteira. Estas tornam-se mesmo imprescindíveis dotando os resultados de valores coerentes, pelo que se torna fundamental entender o seu desempenho e modo de representação, concisamente descritos no capítulo 4.

Ainda assim foi fulcral na presente dissertação tornar o modelo susceptível da obtenção de resultados fiáveis, tendo em conta que apesar do modelo apresentado ser em 2D, muitas vezes, por rapidez de processamento de dados pelo computador são adoptados com grande sucesso por parte dos resultados obtidos. Aliado a este factor, estes presenteiam igualmente a vantagem de não se desviarem significativamente dos modelos efectuados em 3D.

Do ponto de vista metodológico, o estudo do problema contém três fases fundamentais: a geração das forças e respectiva interacção com a estrada; a fase de propagação através do pavimento e do solo; e por último a fase de recepção da excitação por parte do edifício.

Quanto ao solucionamento do problema enquanto análise dinâmica, este pode ser realizado analiticamente ou numericamente por um lado, ou de um modo empírico ou semi-empírico por outro. No caso em estudo a análise, à qual se submeteu o modelo a gerar, foi a regida por um processo numérico cuja resolução foi conseguida através do programa de elementos finitos ANSYS.

1.2. OBJECTIVOS

São apresentados como objectivos da presente dissertação, a modelação numérica de um edifício constituído por laboratórios altamente sensíveis a microvibrações, e do terreno envolvente desde a faixa de rodagem pela qual circulam os veículos pesados. Tornou-se ainda imprescindível contemplar uma zona sobrejacente do terreno envolto a este sistema, para que a propagação das ondas vibratórias não fosse perturbada pela presença de fronteiras nas imediações dos limites das zonas a analisar.

A estratificação e características do terreno determinam um factor preponderante no modo de propagação das ondas, pelo que se tornou relevante analisar as interferências que estas mudanças podem influir na resposta da estrutura.

A simulação da circulação de veículos pesados, teve como intuito final analisar e quantificar as velocidades das vibrações que podem ocorrer na estrutura, comparando posteriormente com os valores fornecidos pelos critérios genéricos de vibração, avaliando ainda de que forma varia a velocidade com o acréscimo de veículos a circular na via e com o nível de qualidade do pavimento.

Pretendeu-se ainda desenvolver a aptidão de transpor um caso real para um modelo, utilizando como recurso o software de elementos finitos ANSYS.

A análise de sensibilidade dos resultados, posterior necessidade de correcções e capacidade de arguir face as discrepâncias existentes entre os resultados dos diferentes cenários, instituiu igualmente um dos objectivos da presente dissertação.

1.3. ORGANIZAÇÃO EM CAPÍTULOS

O presente trabalho apresenta-se organizado segundo 7 capítulos durante os quais é desenvolvida a problemática das vibrações de baixa frequência induzidas por tráfego rodoviário em edifícios sensíveis.

No capítulo 1 é apresentado introdutoriamente o tema proposto para o desenvolvimento da tese, explicitando o âmbito em que surgem as vibrações de baixa frequência e o porquê da necessidade do seu estudo. Referem-se consequentemente quais os efeitos que estas podem introduzir. Expõe-se igualmente o modo como o problema foi solucionado através da modelação numérica.

Por seu turno no capítulo 2 apresentam-se estudos elaborados por alguns autores no campo das vibrações de baixa frequência, abordando o mecanismo de excitação, o modo como as vibrações se propagam no solo, e as possíveis sequelas na estrutura receptora. São enunciadas algumas das medidas mitigadoras às quais se podem recorrer de modo a precaver situações indesejáveis. É igualmente neste capítulo que se pode conhecer qual o critério genérico de vibração e respectiva aplicabilidade de acordo com o tipo de actividade desenvolvida nos edifícios.

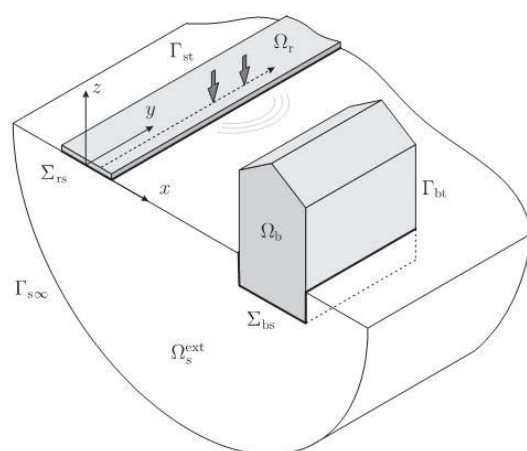
O capítulo 3 trata a informação que pretende caracterizar o edifício “sensível”, desde a respectiva localização do edifício face à via onde circulam os veículos, à apresentação da estrutura e descrição da tipologia dos laboratórios que se pretendem para análise, bem como dos respectivos critérios aplicáveis.

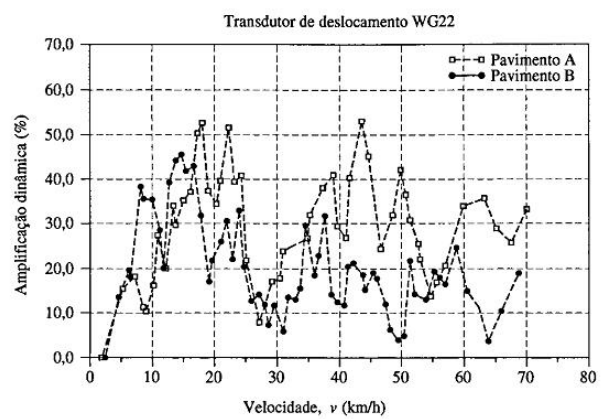
Quanto à metodologia de análise adoptada, a sua justificação é facultada ao longo do capítulo 4. Os aspectos teóricos envoltos na análise do modelo adoptado permitem entender o modo como uma análise numérica de um modelo de elementos finitos pode ser realizada. Neste capítulo é focado o método de Newmark, um método de integração directa, segundo o qual o programa ANSYS baseia a sua metodologia de cálculo durante uma análise transitória. A explicação das condições fronteira, da discretização do domínio e do amortecimento implementados no modelo desenvolvido são também alvo de breve reflexão teórica neste capítulo.

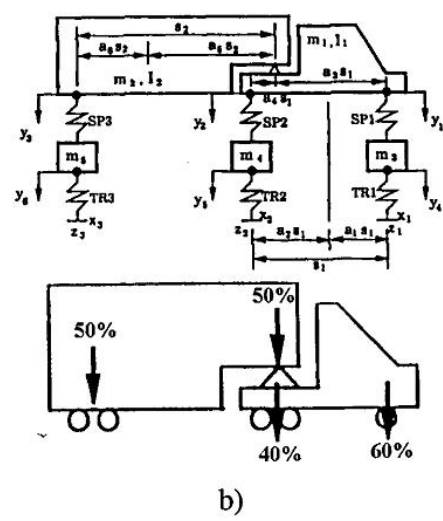
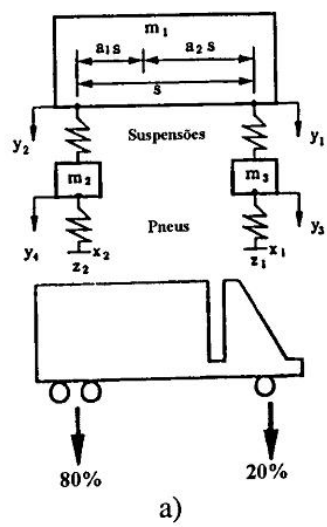
O capítulo 5, visa explicitar a “passagem” de um caso real para o modelo, fornecendo a informação à qual se recorreu para tal concretização. Este capítulo inclui ainda a forma como foram obtidas as cargas que induzem a excitação no sistema a partir das parcelas correspondentes à componente estática e à componente dinâmica.

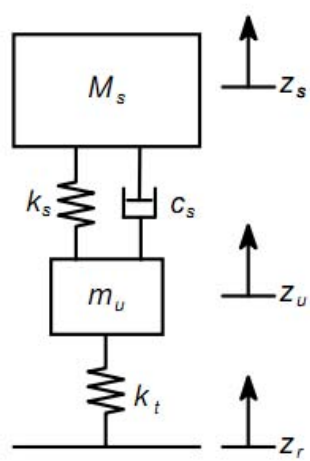
A análise e apresentação dos resultados obtidos, expostas ao longo do capítulo 6, resultaram nalgumas ilações extraídas a partir das comparações entre os diferentes cenários simulados.

Por último o capítulo 7, reservado às conclusões, permite inferir através das comparações entre os diferentes cenários avaliados sobre a influência da alteração dos parâmetros referentes às irregularidades do pavimento das vias através da qual circulam os veículos, ou do aumento da solicitação do sistema quando submetida a uma acção dinâmica redobrada. De acordo com os critérios genéricos de vibração e por comparação destes com os valores obtidos para as velocidades de chegada à estrutura receptora, pôde-se inferir sobre os motivos para o seu incumprimento.









k_s : rigidez da suspensão;

c_s : amortecimento da suspensão;

k_t : rigidez vertical dos pneumáticos.

$$M_s \ddot{z}_s = F_{\text{rigidez da suspensão}} + F_{\text{amortecimento da suspensão}} \quad (2.1)$$

$$m_u \ddot{z}_u = F_{\text{rigidez do pneu}} - F_{\text{rigidez da suspensão}} - F_{\text{amortecimento da suspensão}} \quad (2.2)$$

Este modelo tem a característica de apresentar propriedades lineares, no entanto as propriedades da suspensão dos veículos não são lineares, sendo consequentemente dependentes do movimento do veículo, pelo que há necessidade de estabelecer, para os modelos não lineares, a posição de equilíbrio para as curvas características das molas da suspensão [2].

Usualmente as frequências predominantes incidem sobre dois intervalos, entre 1,5 e 4 Hz, correspondentes a modos de vibração que envolvem os movimentos das caixas dos veículos sobre as suspensões e pneus, e entre 10 e 14 Hz, correspondentes às vibrações dos eixos dos veículos [1], pelo que na análise dinâmica deve-se ter especial incidência sobre tais frequências, comparando com os modos de vibração do sistema constituído pelo solo-estrutura.

2.2.2. PROPAGAÇÃO DAS VIBRAÇÕES NO SOLO

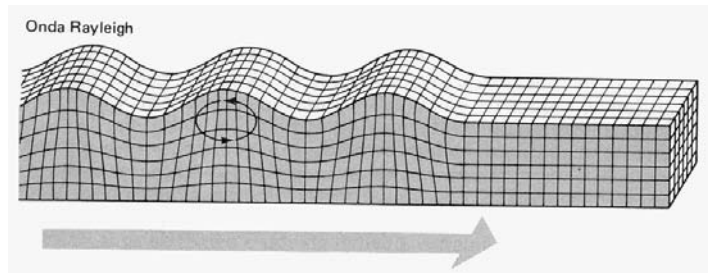
A propagação das vibrações induzidas pelo tráfego a partir da fonte depende da distância que estas têm que percorrer até à estrutura receptora, das suas frequências de vibração, da topografia entre o emissor e o receptor, e de características geotécnicas do terreno.

É através do movimento das partículas existentes nos diferentes estratos do terreno que a vibração se propaga a partir da fonte. Apesar da complexidade que envolve este fenómeno, a modelação do solo é na maioria dos estudos tomada como um meio elástico e isotrópico, através do qual se podem propagar dois tipos de ondas, as designadas por ondas de corpo ou de volume, ondas P e ondas S, e as ondas superficiais, ondas Rayleigh e ondas Love. As ondas P são as primeiras a chegar devido à sua maior velocidade de propagação, são longitudinais e fazem as partículas vibrar na direcção paralela à da onda, provocando alternadamente compressão e distensão. Por sua vez as ondas S são ondas transversais, pelo que o solo é deslocado perpendicularmente à direcção de propagação, no entanto não provocam alteração de volume mas sim alterações morfológicas. Estas estão intimamente ligadas ao módulo de distorção, já que através da medição da sua velocidade de propagação é possível quantificar G_0 , equação (2.3).

$$G_0 = \rho v_s^2 \quad (2.3)$$

ρ : massa volúmica [kg/m^3]

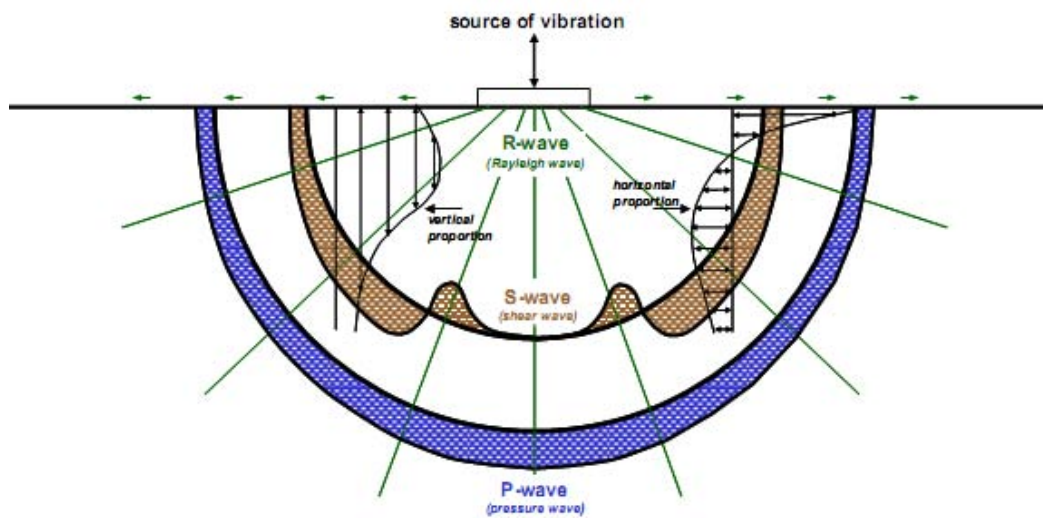
v_s : velocidade de propagação das ondas S [m/s]



$$v = v_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-n} e^{-\alpha(r-r_0)} \quad (2.4)$$

Tipo de Onda	Excitação pontual	Excitação uniformemente distribuída
S	1	0,5
P	1	0,5
Rayleigh	0,5	1
Love	0,5	1

Tipo de solo	Atenuação do solo – α [m ⁻¹]
Argilas saturadas	0,04 – 0,12
Areias e siltes	0,04



Quanto à modelação de um solo submetido a vibrações, esta, apesar da sua heterogeneidade, pode ser levada a cabo considerando-o um meio elástico e homogéneo, constituído por vários estratos com distintas propriedades, das quais se salientam, o coeficiente de Poisson, e o módulo de distorção G_0 . Na tabela que se segue, quadro 2.3, pode-se observar qual o modelo de comportamento do solo a adoptar de acordo com o fenómeno a estudar. O modelo analisado na presente dissertação é regido por um comportamento linear elástico, já que o estudo da propagação das ondas no solo induz deformações por corte de muito reduzidas dimensões. De acordo com este comportamento, a rigidez ao corte do solo é caracterizada pelo módulo de distorção máximo ou inicial, $G_{\text{máx}}$ ou G_0 .

Quadro 2.3 – Mudança no comportamento do solo com a deformação por corte e modelação correspondente (Ishihara) [3]

Deformação por corte	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
Fenómeno	Propagação de ondas, vibrações		Assentamentos diferenciais, fissuras		Escorregamento, compactação, liquefacção	
Características mecânicas	Elástico		Elasto-Plástico		Rotura	
Propriedades	Módulo de distorção, Coeficiente de Poisson, Amortecimento material				Ângulo de fricção, coesão	
Modelo do comportamento do solo	Modelo Linear Elástico		Modelo linear equivalente		Modelo cíclico não-linear	

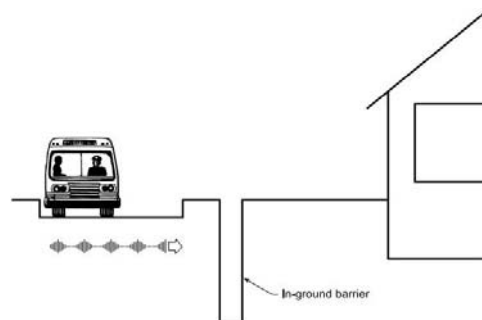
Teoricamente, de acordo com o comportamento linear elástico, seria de esperar que não ocorresse dissipação de energia, no entanto, e segundo Hall & Richart [3], está comprovado que existe sempre alguma dissipação, pelo que o amortecimento material nunca é nulo.

Um outro factor condicionante na velocidade e modo de vibração do sistema, quando submetido a uma acção dinâmica, assenta no fenómeno de refacção e reflexão das ondas na interface existente na transição entre dois estratos. A reflexão consiste no retorno da energia incidente em direcção à região de onde ela é oriunda ao entrar em contacto com a interface, já a refacção consiste na passagem da energia de um meio para o outro, atravessando a interface de separação. A direcção e amplitude relativa das ondas produzidas na interface das duas camadas dependem da direcção da onda incidente na interface (Lei de Snell) e da velocidade de propagação e densidade dos distintos estratos.

2.2.3. RECEPTOR - ESTRUTURA

As vibrações transmitidas através do solo para a estrutura, desde as fundações até aos restantes elementos resistentes, dependem igualmente de inúmeros parâmetros característicos dos materiais constituintes do edifício, bem como do grau de hiperstaticidade e modo de ligação executado entre os diferentes elementos.

No caso das vibrações induzidas pelo tráfego rodoviário os únicos problemas a aferir estarão certamente relacionados com os eventuais distúrbios causados nas populações, residentes nas



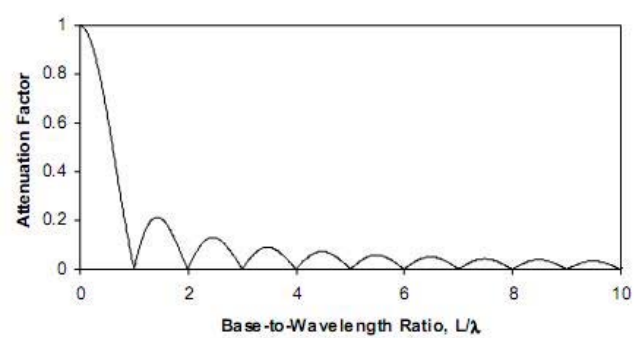
Com ou sem trincheira	Solo (MPa)	Velocidade do comboio TGV (km/h)	3D	
			Nó 18	
			Velocidade rms (mm/s)	%
Sem	100	350	1,6	77,5%
Com	100		0,36	
Sem	200		0,53	81,13%
Com	200		0,1	

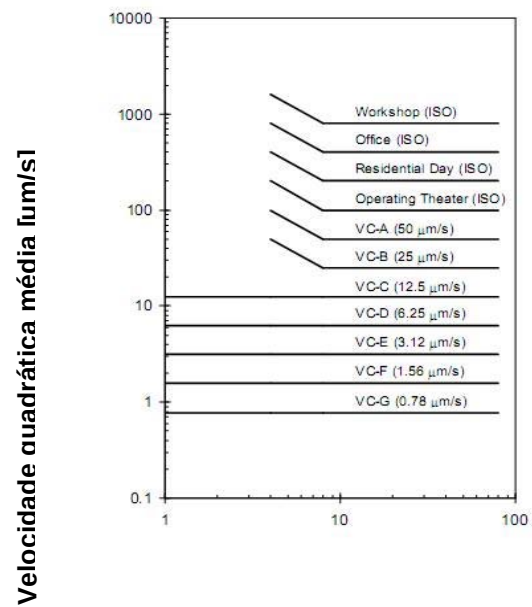


Sem Isolamento de Base

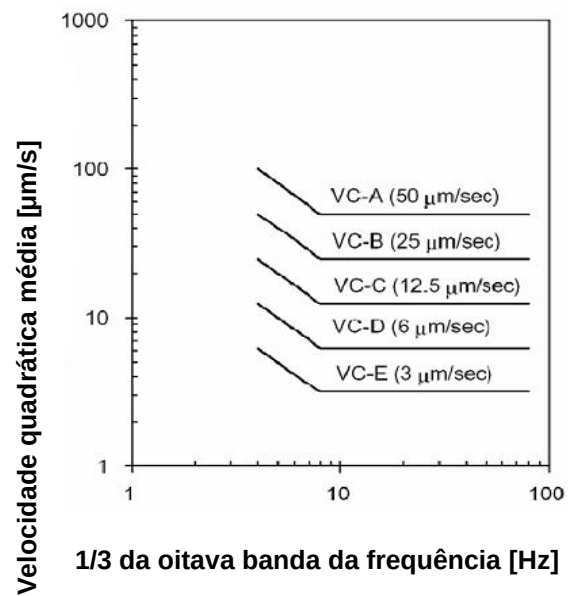


Com Isolamento de Base





1/3 da oitava banda da frequência [Hz]



1/3 da oitava banda da frequência [Hz]

3

BREVE DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO A ESTUDAR

3.1. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO “SENSÍVEL”

Visando avaliar a influência que as vibrações, oriundas da circulação de veículos pesados, podem exercer sobre um edifício de investigação científica, altamente sensível a micro vibrações, foi recriada uma estrutura, sobre a qual se pretendeu determinar, através de uma análise dinâmica, as velocidades que se produzem ao nível dos laboratórios. Quanto à localização do edifício face à via de comunicação, estipulou-se um distanciamento de 65,85m do separador flexível, segundo a qual se pretendeu simular a condição de simetria que se referirá numa fase posterior. Esta faixa de rodagem, detentora de 3 vias de circulação, apresenta uma largura total de 10,5m. O edifício possui dois pisos e, além das instalações habituais de um laboratório científico, inclui instalações especiais características de laboratórios de nanotecnologia. Estas instalações, devido aos seus requisitos enquanto ciência que lida com objectos de dimensão de nanómetros, necessita da existência de uma importante parte das instalações laboratoriais destinada às designadas “Cleanrooms”, que asseguram o ambiente “limpo” propício ao prosseguimento das investigações aí desenvolvidas.

A estrutura analisada simplificada de um edifício corrente, através da adopção de uma estrutura porticada construída em betão e constituída por dois pisos, com excepção do primeiro tramo do pórtico que detém ainda de um piso parcialmente enterrado, detém a particularidade de possuir um ensoleiramento com 2m de altura que pretende a mitigação das vibrações induzidas. Este elemento existe ao nível do piso 0 e -1 e para uniformizar as condições de fundação recorreu-se a uma substituição de solos menos capazes por betão de limpeza numa espessura de cerca de 3m.

3.2. DESCRIÇÃO GEOTÉCNICA

Quanto à estratificação adoptada para o solo, foi realizada uma simplificação geométrica a partir de uma secção geotécnica fornecida, segundo o corte que se pretendeu estudar, localizado perpendicularmente às vias de comunicação.

Segundo o relatório geotécnico e pelo que se pôde observar através da secção geotécnica, o solo estudado apresenta seis estratos distintos, cuja geometria é bastante variável.

O aterro, constituído por uma mistura de areia e silte com composição variável, é o primeiro estrato e apesar de deter de uma compactação variável, apresenta na sua generalidade uma reduzida capacidade ao corte.

O segundo estrato, constituído maioritariamente por areia fina, constitui aluviões quaternários de areia. Subjacente a este estrato, conformado em apenas algumas zonas, encontra-se areia fluvial quaternária, constituída principalmente por areia média a grossa.

Finalmente as outras três camadas constituem rochas metamórficas, mais propriamente designadas de micaxisto e migmatite, que sofreram desintegração e ou decomposição. Assim a um nível mais superficial a rocha primária foi decomposta em silte, areia fina e gravilha em diferentes proporções, apresentando uma capacidade resistente ao corte que aumenta em profundidade. Com o aumento da profundidade, o seu grau de decomposição configura-se cada vez menor, confinando características próximas do bedrock.

Relativamente ao nível freático, este durante o estudo geotécnico foi observado entre 2 e 2,5m abaixo da superfície. As explorações geotécnicas foram levadas a cabo precisamente durante os meses de maior pluviosidade, Março e Abril, o que estabeleceu que o nível freático se situasse acima da média.

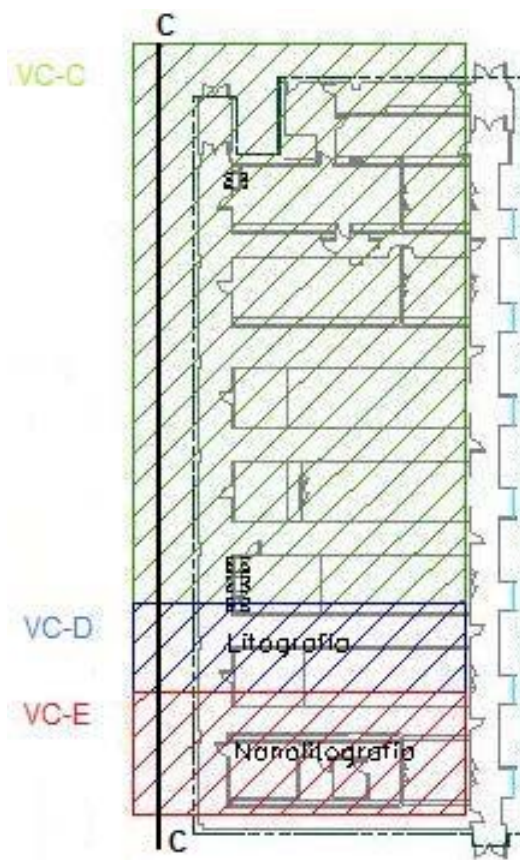
3.3. CRITÉRIOS GENÉRICOS DE VIBRAÇÃO

De acordo com o tipo de utilização determinada para cada compartimento do edifício, é esperado consequentemente o cumprimento dos critérios estipulados nas *VC curves*. No quadro 3.1 encontram-se os critérios genéricos de vibração, de acordo com a actividade desenvolvida em cada laboratório.

Quadro 3.1 – Critérios genéricos de vibração a aplicar de acordo com o tipo de laboratório

Espaço	Nível	Critério $\mu\text{m/s}$
Laboratórios gerais	0 e 1	50 (VC-A)
“Cleanrooms”	0	12.5 (VC-C)
Litografia	0	6,4 (VC-D)
Nanolitografia	0	3,2 (VC-E)

Para uma melhor percepção, segue-se exemplificadamente a planta, figura 3.1, referente ao piso 0, do edifício “sensível” que se pretendeu para análise, onde estão representados a diferentes layers a designação específica dos laboratórios e respectivo critério a cumprir.



4

METODOLOGIA DE ANÁLISE

4.1. INTRODUÇÃO

Os problemas de engenharia, essencialmente de natureza contínua, podem ser resolvidos como problemas discretos, através de modelos em função de um número finito de parâmetros, ou podem ser formulados usando o conceito de infinitesimal o que conduz a equações diferenciais que implicam um número infinito de elementos. O Método de Elementos Finitos (MEF) é efectivamente um método numérico de resolução de equações diferenciais de problemas com discretização do domínio.

A resolução de problemas usando o MEF, envolve diversas fases das quais se salientam a divisão do domínio contínuo, as relações ao nível do elemento e a resolução do sistema de equações.

Durante a divisão do domínio torna-se fulcral o conhecimento e estabelecimento das características de cada elemento, geometria, propriedades materiais e ligações entre eles.

Por sua vez, a aproximação ao nível do elemento pretende a substituição da função integral incógnita por uma sua aproximação que pode ser introduzida no campo dos deslocamentos, no das forças ou simultaneamente em ambos. Como será obvio de entender, quanto maior o número de nós, mais se aproximará o problema de um problema contínuo e consequentemente maior o grau de precisão e exactidão. No capítulo que se segue este tema é alvo de um maior desenvolvimento, visto ter sido fulcral para o entendimento de conceitos envolvidos para a realização do modelo elaborado.

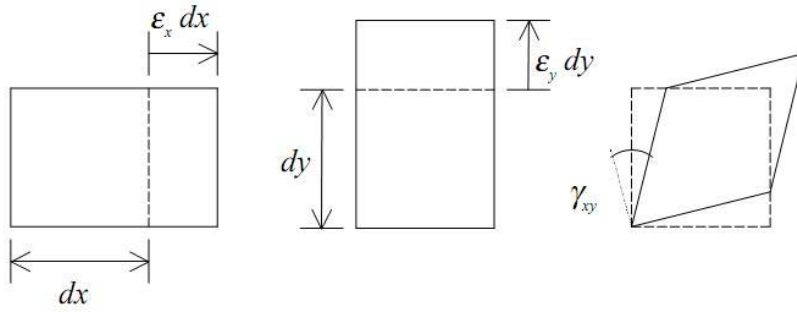
Quanto às relações ao nível do elemento, estas podem ser geométricas, constitutivas ou regentes do fenómeno em estudo.

No caso da presente dissertação, o modelo realizado em 2D de uma estrutura porticada assente sobre o terreno estratificado, ao longo do qual são propagadas as vibrações induzidas pelo tráfego rodoviário, considera uma espessura constante de 1 m, pelo que constitui um problema regido pelo Estado Plano de Deformação, já que são admitidas válidas as seguintes hipóteses: $\epsilon_{xz} = \epsilon_{yz} = \epsilon_z = 0$, e ϵ_x , ϵ_y e ϵ_{xy} não variam com z . Deste pressuposto resultam as seguintes relações fundamentais para problemas de elasticidade linear em Estado Planos de Deformação. A relação geométrica é dada, admitindo válida a hipótese dos pequenos deslocamentos, pela relação entre deslocamentos e deformações:

$$\epsilon = [L]u \quad (4.1)$$

onde ϵ é o vector das deformações de um ponto genérico, e $[L]$ o operador diferencial de compatibilidade. Esta pode ainda ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial/\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$



$$\sigma = [D]\varepsilon \quad (4.3)$$

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f(t)\} \quad (4.5)$$

onde $[M]$ é a matriz de massa, $[C]$ a matriz de amortecimento, $[K]$ a matriz de rigidez da estrutura/sistema, $\{u\}$ são os deslocamentos, $\{\dot{u}\}$ as velocidades e $\{\ddot{u}\}$ as acelerações do conjunto de pontos designados, no caso do método dos elementos finitos por pontos nodais. Esta impõe o equilíbrio de forças que é necessário assegurar para cada grau de liberdade, isto é o somatório das forças de inércia, das forças de amortecimento e das forças elástica têm necessariamente que igualar as forças exteriores.

4.2. SISTEMAS INELÁSTICOS VS SISTEMAS ELÁSTICOS

Quanto ao tipo de sistemas, podem-se nomear os lineares elásticos e os inelásticos. No caso dos sistemas lineares elásticos, $f_s = ku$, o que determina que a força resistente seja unicamente dependente de u , já que k é constante. Ao invés, nos sistemas inelásticos, a força f não é unicamente dependente de u , mas também da história de deformações, pelo que na análise dinâmica, esta tem que reconhecer as forças e deformações às quais a estrutura já foi submetida antes da excitação dinâmica, que se pretende analisar, se iniciar. No caso em estudo, a excitação dinâmica dos sistemas é induzida pelo tráfego rodoviário suscitando por conseguinte deformações de muito reduzidas dimensões, cuja limitação imposta é adjudicada pela funcionalidade requerida para o desenvolvimento das actividades específicas em edifícios sensíveis. Daí se conclui facilmente, tal como foi enunciado anteriormente, que os sistemas analisados são regidos pela lei de Hooke, designando-se por sistemas com comportamento linear elástico.

4.3. MÉTODOS DE RESOLUÇÃO DO EQUILÍBRIO DINÂMICO

Quanto ao solucionamento da equação fundamental da dinâmica, esta pode ser obtida através de inúmeras técnicas numéricas, das quais se destacam o método de sobreposição modal e os métodos de integração directa.

O recurso à sobreposição modal permite a obtenção da solução final, isto é dos respectivos deslocamentos, através do somatório do produto entre as coordenadas modais e os modos de vibração. Esta metodologia tem a vantagem de ser um método eficaz e simples, cuja aplicação é muito vantajosa no caso de se pretender obter a resposta usando poucos modos de vibração. A ideia principal, na qual a metodologia se baseia, está sobrejacente na transformação do sistema de equações antes de proceder à sua integração, através da mudança da base em que são representados os deslocamentos, de forma a obter equações dinâmicas de equilíbrio desacopladas. A integração numérica de cada uma das equações de cada grau de liberdade pode então posteriormente ser executada recorrendo-se ao método de Newmark. As suas principais desvantagens prendem-se com o facto do seu recurso estar limitado a estruturas com comportamento linear e a ineficiência do seu processo na determinação das coordenadas modais aquando a aplicação de excitações de curta duração. Refere-se ainda que este procedimento só pudera ter lugar após uma análise clássica modal que permite a obtenção dos modos de vibração da estrutura.

Por sua vez os métodos de integração directa permitem a resolução de sistemas não-lineares, facultam o solucionamento de sistemas com amortecimento não clássico ou de sistemas constituídos por vários subsistemas. Estes têm como princípio a integração numérica das equações diferenciais de segunda ordem que regem o equilíbrio dinâmico da estrutura, sem necessitar de realizar qualquer transformação. Este tipo de análise ao envolver integração numérica, permite a obtenção da solução em sucessivos intervalos de tempo, pelo que o tempo de duração da análise pretendida para o estudo do sistema deve ser subdividido em intervalos de tempo Δt . A validação da equação geral da dinâmica é então efectuada para cada intervalo Δt , sendo necessário definir *à priori* os valores iniciais do

deslocamento, velocidade e aceleração para que o algoritmo possa ser desenvolvido. A equação de movimento para o instante t_i é:

$$M\ddot{u}_i + C\dot{u}_i + (f_s)_i = P_i \quad (4.6)$$

onde $(f_s)_i = k u_i$ caso o sistema seja linearmente elástico.

Durante a realização do procedimento numérico é necessário ter em consideração três requerimentos fundamentais para otimizar o processo: a convergência, onde a solução deve aproximar-se da solução exacta; a estabilidade, tal que a solução permaneça estável na presença de erros numéricos; e finalmente a precisão.

Os métodos de integração directa podem ainda ser subdivididos em métodos implícitos e explícitos. Por um lado existem os métodos explícitos cuja solução é determinada para o instante $t+\Delta t$ com base na solução obtida para t , por outro os métodos implícitos facultam a solução para o instante $t+\Delta t$ apoiando-se nos valores obtidos em t e em $t+\Delta t$, implicando necessariamente a inversão da matriz de rigidez.

A característica principal destes métodos está sobrejacente na imposição de uma lei de variação dos deslocamentos, velocidades e acelerações durante o intervalo Δt , e o modo como esta lei é imposta deve ser definida através da escolha de um dos diferentes métodos de integração directa. De entre estes métodos destacam-se o método das diferenças centrais, o método de Houbolt, o método de Wilson θ e o método de Newmark.

No âmbito deste trabalho apenas se justificou o desenvolvimento do método de integração passo a passo, de Newmark, visto ser com base neste, que é regida a opção da análise dinâmica transitória facultada pelo programa Ansys. A análise dinâmica transitória permite pois o cálculo da resposta da estrutura/ sistema quando esta é solicitada por carregamentos que variam ao longo do tempo, tal como é o caso de excitações geradas por tráfego rodoviário.

4.3.1. MÉTODOS DE INTEGRAÇÃO DIRECTA – MÉTODO DE NEWMARK

O método de Newmark é um método de integração directo implícito. Este é uma generalização do método de aceleração linear e admite a hipótese de uma variação linear das acelerações dentro dos intervalos de tempo Δt , pelo que a equação fundamental da dinâmica é alterada da seguinte forma:

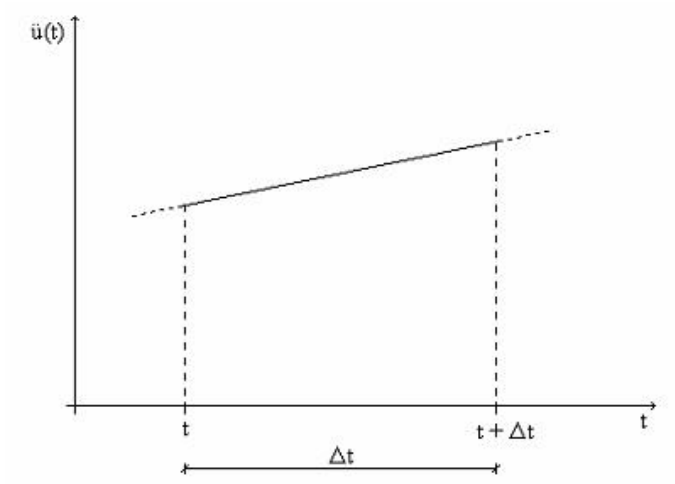
$$[M]\{\ddot{u}_{t+\Delta t}\} + [C]\{\dot{u}_{t+\Delta t}\} + [K]\{u_{t+\Delta t}\} = \{P_{t+\Delta t}\} \quad (4.7)$$

onde os deslocamentos e as velocidades são definidos, respectivamente, da seguinte forma:

$$\{u_{t+\Delta t}\} = \{u_t\} + \Delta t\{\dot{u}_t\} + \Delta t^2 \left(\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \{\ddot{u}_t\} + \beta \{\ddot{u}_{t+\Delta t}\} \right) \quad (4.8)$$

$$\{\dot{u}_{t+\Delta t}\} = \{\dot{u}_t\} + \Delta t \left((1 - \gamma)\{\ddot{u}_t\} + \gamma\{\ddot{u}_{t+\Delta t}\} \right) \quad (4.9)$$

$$\frac{\Delta t}{T_n} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{\gamma - 2\beta}} \quad (4.10)$$



$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (4.11)$$

Após obtidas as matrizes de K e M, as frequências w , podem ser obtidas através da resolução da designada equação característica ou de frequência:

$$\det(K - w^2 M) = 0 \quad (4.12)$$

Por sua vez, já na posse das frequências, os modos de vibração ϕ_n , são obtidos através da equação que se segue:

$$[K - w_n^2 m]\phi_n = 0 \quad (4.13)$$

4.3.2.2. Sobreposição modal

Uma vez obtidos os modos de vibração do sistema, o método da sobreposição modal permite a obtenção das equações de movimento desacopladas:

$$\ddot{u}_n + 2\xi_n w_n \dot{u}_n + w_n^2 u_n = \frac{F_n(t)}{M_n} \quad (4.14)$$

onde M_n e F_n são as matrizes de massa e forças generalizadas:

$$M_n = \phi_n^t M \phi_n \quad (4.15)$$

$$F_n(t) = \phi_n^t F(t) \quad (4.16)$$

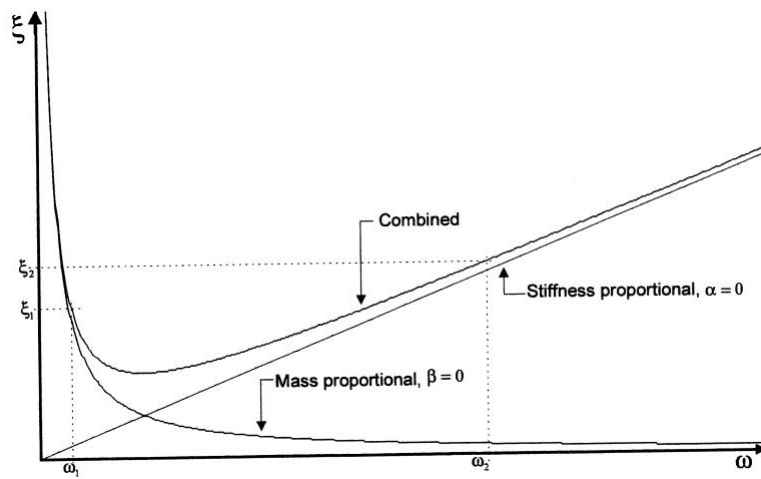
As equações de movimento desligadas podem então ser resolvidas com recurso, por exemplo, ao Método de Newmark.

4.4. SISTEMAS AMORTECIDOS – AMORTECIMENTO DE RAYLEIGH

Na engenharia estrutural, é impraticável determinar os coeficientes da matriz de amortecimento directamente a partir das respectivas propriedades de amortecimento dos materiais estruturais. E mesmo que estas propriedades fossem bem conhecidas a matriz seria, ainda assim, incapacitada de envolver todos os fenómenos de dissipação de energia ocorrida durante a transmissão dos esforços, devidas a abertura e fecho de microfissuras do betão, fricção dos elementos estruturais, etc. Existe, no entanto, a possibilidade de estimar o coeficiente de amortecimento, para determinados casos em particular, usando valores computados para estruturas similares por métodos experimentais, através de

$$C = \alpha M + \beta K \quad (4.17)$$

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/w_i & w_i \\ 1/w_j & w_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{Bmatrix} \quad (4.18)$$



Como se pode averiguar, por análise do gráfico, α é crescente com o acréscimo da frequência, enquanto β é sempre bastante menor que α e sofre ligeiras diferenças com a variação das frequências, pelo que se pode concluir que a matriz de amortecimento tem uma grande dependência da matriz de massa.

A aplicação deste método é muitas das vezes referenciada como irrealista, já que a assumção da proporcionalidade entre a massa e o amortecimento implica a existência de amortecedores externos de suporte à estrutura, fisicamente impossíveis. Já o caso da proporcionalidade proposta entre a rigidez e o amortecimento tem o efeito de aumentar o amortecimento para modos de vibração maiores para os quais não existe explicação física [11].

No entanto, o recurso a este tipo de amortecimento tem como intuito, tal como foi referido, evitar a necessidade de formar uma matriz de amortecimento baseada nas propriedades físicas do sistema, sendo muito utilizado por programas de cálculo tais como o Ansys.

O caso estudado na presente dissertação deveria apresentar a peculiaridade de constituir uma matriz de amortecimento não clássico pelo facto de ser constituído por dois subsistemas com diferentes coeficientes de amortecimento. Desta forma a matriz de amortecimento do sistema completo deveria ser construída por assemblagem das matrizes de amortecimentos dos dois subsistemas. Esta apresenta a particularidade de contemplar numa das partes da matriz completa a contribuições dos dois subsistemas, associada aos graus de liberdade da interface entre os dois subsistemas. Este mecanismo de construção, é igualmente válido e aplicável nas matrizes globais de massa e de rigidez. Para estes casos, em que um sistema é constituído por dois subsistemas, pode-se idênticamente recorrer ao amortecimento de Rayleigh e consequentemente a matriz de amortecimento para a estrutura e solo de fundação podem ser expressas, respectivamente, através das seguintes relações:

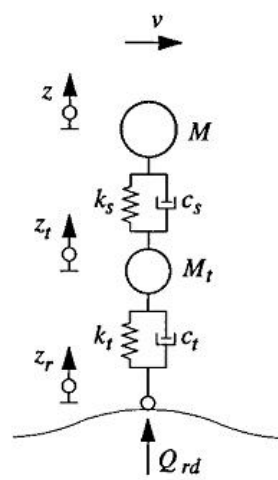
$$c = \alpha m + \beta k \quad (4.19)$$

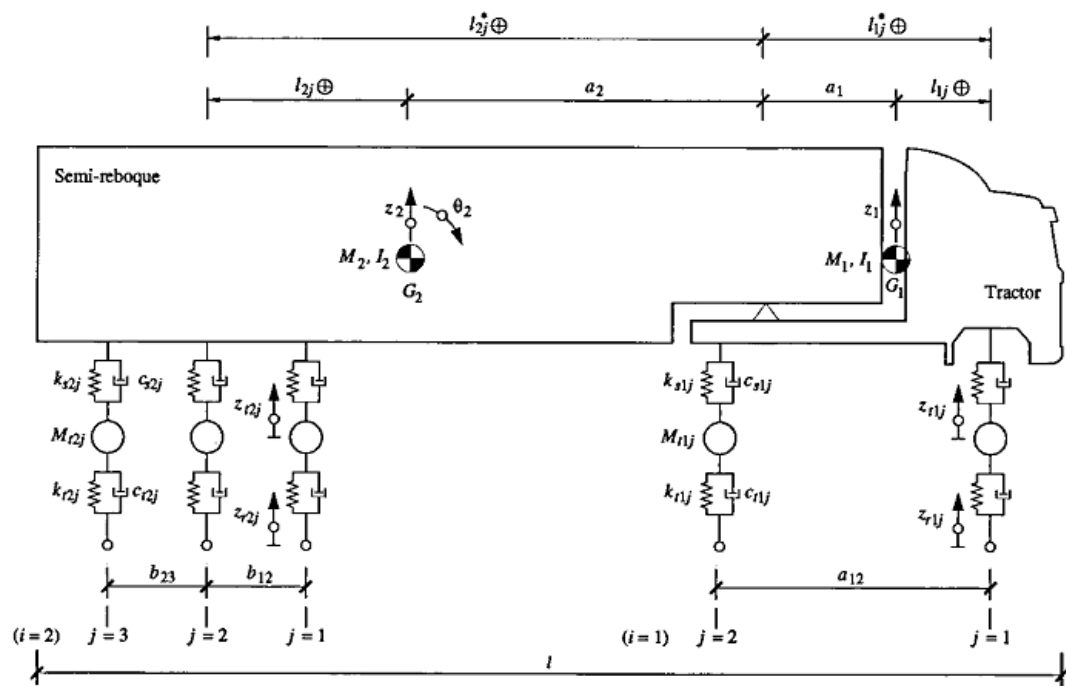
$$c_f = \alpha_f m_f + \beta_f k_f \quad (4.20)$$

No entanto, no caso em análise e por simplificação, adoptou-se um único coeficiente de amortecimento comum para os dois subsistemas.

4.5. ACÇÃO DINÂMICA TRANSMITIDA PELO TRÁFEGO RODOVIÁRIO

A acção, transmitida pelo tráfego rodoviário, que induz vibrações no sistema, foi representada através de uma analogia com um conjunto de cargas verticais móveis. As componentes estáticas e dinâmicas dessas forças são correntemente distribuídas por cada um dos eixos do veículo, cujo percurso, para uma análise 2D, não pode ser definido, pelo que a sua simulação foi conseguida através da atribuição de um instante de tempo para cada um dos vectores solicitação. Deste modo num instante t_1 actua uma determinada força e no instante seguinte, $t_1 + \Delta t$, actua uma outra força no seguimento da ideologia da distância entre eixos e entre veículos. Os eixos da via que seriam representados por elementos numa modelação 3D, no caso 2D são referenciados como nós, constituintes da malha do modelo. Na modelação adoptada, admitiu-se ainda que a velocidade de circulação dos veículos é constante.

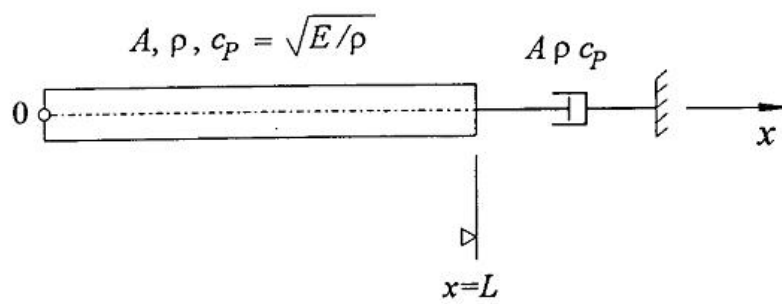




$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} - \frac{1}{c_p^2} \ddot{u}_x = 0 \quad (4.21)$$

$$c_p = \sqrt{E/\rho}$$

$$\sigma_x + \rho c_p \dot{u}_x = 0 \quad (4.22)$$



$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} - \frac{1}{c_s^2} \ddot{u}_y = 0 \quad (4.23)$$

$$c_s = \sqrt{G/\rho}$$

$$\tau_{xy} + \rho c_s \dot{u}_y = 0 \quad (4.24)$$

em $x=L$.

Intui-se portanto que para dotar um sistema 2D de uma condição de radiação na fronteira, relativamente a ondas cuja direcção de propagação lhe seja perpendicular, pode ser alcançada através da modelação de um conjunto de amortecedores com viscosidades, ρc_s e ρc_p . No entanto, a necessidade de dotar a fronteira de uma radiação perfeita para todas as ondas, que se propagam com distintos ângulos de incidência, foi conseguida por *White et al.* através da obtenção da matriz constitutiva ponderada de amortecimento, C'_{pon} [14]:

$$C'_{pon} = \frac{8\sqrt{\rho G}}{15\pi} \begin{vmatrix} 5/s - 2s + 2 & 0 \\ 0 & 2s + 3 \end{vmatrix} \quad (4.25)$$

$$\text{onde } s = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}.$$

4.7. DESCRITIZAÇÃO DO DOMÍNIO DO MODELO

Um dos primeiros passos a ter em consideração, após definida a geometria bem como os materiais e respectivas propriedades do modelo que se pretende elaborar, é a realização da descritização do domínio, executando uma malha através da definição do tamanho de cada um dos seus elementos. É no entanto necessário salvaguardar o facto de ser necessário efectuar uma escolha óptima conjugando ambos os factores adversos influentes na análise, isto é optando por um valor cuja fiabilidade e precisão da resposta não seja motivo de excessivo tempo de processamento por parte do computador. Durante a realização de uma análise dinâmica, é necessário ter em consideração que os elementos têm que ser suficientemente pequenos para que as frequências elevadas das ondas mais curtas possam ser modeladas. De um modo clássico, o tamanho do elemento é escolhido entre um décimo e um vigésimo do comprimento da onda que se propaga. No entanto, mesmo com esta assumption, o erro numérico pode ser significativo para grandes distâncias de propagação.

No caso de um modelo bidimensional, para a decisão do tamanho da cada elemento da malha, é necessário ter em consideração o tipo de onda, o ângulo de incidência e o tipo de elemento (triangular, quadrilátero, etc).

Tal como foi referido anteriormente, as ondas com um menor comprimento de onda são efectivamente as ondas S. Segundo Lysmer [3], a precisão da resposta dinâmica é atingida em mais de 90%, para uma subdivisão do comprimento de onda em 8 partes.

$$\lambda = c_s / f_{max} \quad (4.26)$$

A medida para os elementos da malha proposta por Lysmer determina um bom consenso entre a economia de tempo de cálculo e a precisão do resultado final, pelo que foi adoptada para a formação da malha do modelo decorrente na presente dissertação.

5

MODELAÇÃO NUMÉRICA DO SISTEMA E QUANTIFICAÇÃO DA ACÇÃO DINÂMICA

5.1. INTRODUÇÃO

Durante este capítulo podem-se visualizar as inúmeras etapas que levaram à concepção do modelo, sobre o qual foi realizada a análise dinâmica suscitada pela excitação originada pela passagem do tráfego rodoviário. Numa primeira fase são enunciados os recursos facilitados pelo software ANSYS, desde elementos a tipologias de análises, que foram eleitos para a posterior fase de modelação e análise do sistema. Posteriormente foram estabelecidas as propriedades e características adoptadas para cada um dos materiais dos dois subsistemas, solo e estrutura. Numa etapa seguinte, podem-se avaliar os procedimentos que levaram à obtenção do modelo final, através do estabelecimento da geometria e geração da malha mais apropriada, segundo parâmetros referidos no capítulo anterior, bem como para a determinação das condições de contorno cinemáticas, isto é apoios e restrições do sistema. A simplificação da geometria foi imprescindível já que condicionava fortemente a geração da malha. O intuito final do envolvimento de todas estas fases teve por base a concepção de um modelo que transparecesse um caso real de um edifício de investigação científica altamente sensível a micro vibrações.

Por fim é explicitado como foi obtida a acção dinâmica que pretendeu simular a circulação dos veículos ao longo de uma via de comunicação nas proximidades da estrutura receptora.

5.2. RECURSOS FACILITADOS PELO PROGRAMA ANSYS ELEITOS PARA A CONCEPÇÃO DO MODELO

O ANSYS, programa para solucionamento de problemas de engenharia para diversos tipos de elementos, apresenta a vantagem acrescida de possibilitar uma óptima elaboração de modelos de elementos finitos. Este desfruta de variadas aplicações, podendo ser aplicada a problemas estáticos ou dinâmicos, entre outros, não tão influentes no campo da engenharia civil. As três fases fundamentais envolvidas na elaboração e cálculo de um modelo, segundo as quais é desenvolvido o programa Ansys são o pré-processamento, o processamento e o pós-processamento.

- Pré-processamento

A fase de pré-processamento é estabelecida pela definição dos tipos de elementos, dos materiais e atribuição das respectivas constantes reais e propriedades, bem como da geometria a implementar.

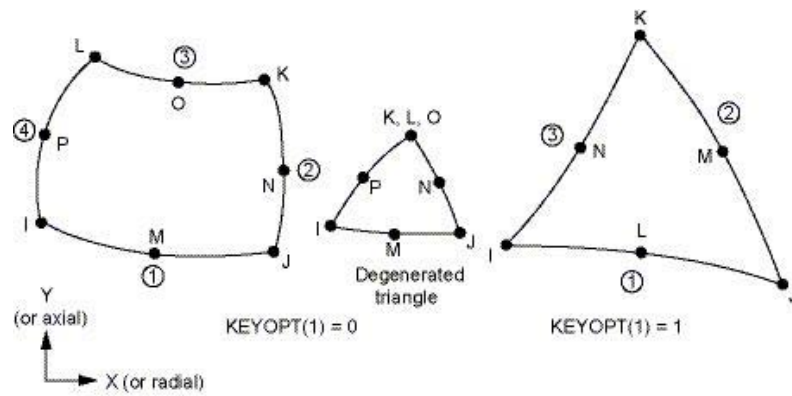
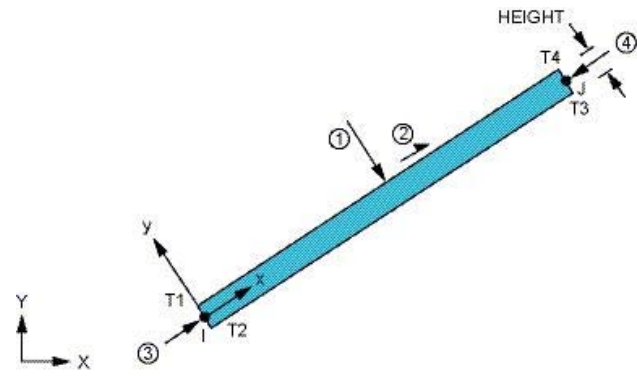
Permite ainda definir o tipo de malha, quanto ao tamanho de cada elemento e tipo de elemento a introduzir. Uma outra etapa conjuntamente imprescindível, durante a fase do pré-processamento, passa pelo estabelecimento das condições fronteira.

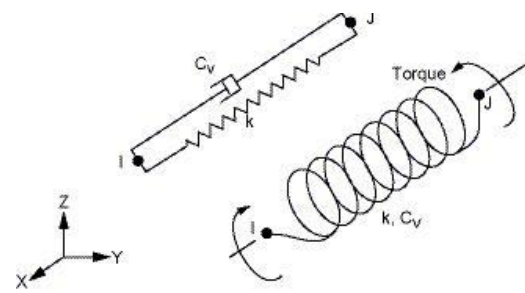
No quadro 5.1 podem-se consultar os tipos de elementos empregues para a concepção do modelo 2D em estudo.

Quadro 5.1 – Tipos de elementos facultados pelo programa ANSYS empregues no modelo elaborado

Tipo de elemento	Categoria	Elemento real a simular	Dados de entrada - Input
PLANE 183	Sólido-2D	Solo	Nós
			Graus de liberdade
			Constantes reais – não aplicáveis para o caso em análise
			Propriedades materiais – E, γ , ν
BEAM 3	Barra	Vigas/ Pilares	Nós
			Graus de liberdade
			Constantes reais – A, Izz, h
			Propriedades materiais – E, γ , ν
COMBIN 14	Especiais	Amortecedores	Nós
			Graus de liberdade
			Constantes reais - cvn, cvt (amortecimento que simula condição de radiação perfeita)
			Propriedades materiais - não aplicáveis para este tipo de elemento

O elemento BEAM 3, figura 5.1, elemento 2D, é definido por dois nós, secção da área, momento de inércia no plano perpendicular ao plano em análise, altura e propriedades materiais. Este elemento uniaxial, possui tensão, compressão e encurvadura. Tal como é referido na tabela, este elemento foi utilizado para a simulação da estrutura porticada, sobre a qual se pretende avaliar o comportamento quando submetida às vibrações induzidas pelo tráfego rodoviário. A estrutura de um edifício pode pois ser simulada por um conjunto de colunas e vigas interconectadas por nós, onde os deslocamentos dos nós são os graus de liberdade.





- Pós-Processamento

Nesta fase, obtêm-se os resultados da análise do programa, sobre as mais variadas formas, desde deslocamentos, velocidades, etc. ao nível dos nós ou de tensões, extensões, etc. ao nível dos elementos.

5.3. PROPRIEDADES MATERIAIS ADOPTADAS PARA A GERAÇÃO DO MODELO

Tal como foi referido, as propriedades materiais estabelecidas como input do programa para o elemento PLANE183 são, o módulo de elasticidade, E , o coeficiente de Poisson, ν , e o peso volúmico, γ . Embora todas estas propriedades sejam facultadas pelo “Geotechnical Report” para a simulação do solo contíguo à estrutura porticada, devido à elevada espessura de algumas das camadas constituintes do solo por onde se propagam as vibrações, optou-se por subdividi-las atribuindo assim um módulo de Young, E , e um módulo cortante G_0 , distinto entre elas e com base nos ensaios SPT realizados sobre o terreno local.

Já no caso do elemento BEAM3, além das propriedades materiais, E , γ e ν , referentes ao betão, foi ainda necessário introduzir as constantes reais das vigas e dos pilares, determinadas pela Inércia, área e espessura de cada um dos elementos resistentes.

5.3.1. PARÂMETROS MECÂNICOS DO SOLO

- Ensaio SPT (“*Standard Penetration Test*”)

A metodologia deste ensaio consiste na cravação, no fundo de um furo de sondagem, de um amostrador normalizado por meio de pancadas de um pilão de 63,5 kgf de peso que cai de uma altura de 76 cm. Este é realizado em duas fases, uma primeira em que se crava o amostrador 15 cm no solo não se registando o nº de pancadas necessário para a sua cravação, e uma segunda fase na qual se crava o amostrador 30 cm registando-se o nº de pancadas, N , para tal feito. Caso após 60 pancadas, não tenham sido atingidos 30 cm de penetração, o processo é interrompido e designado por *nega*, registando-se o comprimento de penetração resultante das 60 pancadas. (Nota: Este valor de 60 pancadas, actualmente e segundo o EC7 é restringido a um valor de 50) [17]

Visto o ensaio não ser normalizado, e por isso que abrange diversos aspectos que variam substancialmente os seus resultados, é imprescindível realizar determinadas correcções de modo a obter um valor corrigido e normalizado que permita ser correlacionado com características e parâmetros do solo.

No quadro 5.2 apresentam-se as correcções necessárias à obtenção do valor corrigido e normalizado, $(N_1)_{60}$ [17].

Quadro 5.2 – Correcções a implementar ao valor N obtido pelo ensaio SPT que permitem a obtenção do ensaio corrigido e normalizado representado por $(N_1)_{60}$ [17]

Correcção do ratio de energia	Factores correctivos do comprimento das varas (segundo Skempton)		Factores correctivos do diâmetro de furo (segundo Skempton)		Correcção que conta com o efeito do nível de tensões efectivas à profundidade do ensaio para o caso de solos arenosos
$N_{60} = \frac{ER_r}{60} \times N$	Comprimento das varas	Factor correctivo	Diâmetro do furo	Factor correctivo	
*Em Portugal o ratio de energia transmitida ao trem de varas $ER_r=60\%$	>10	1,0	65-115	1,0	$(N_1)_{60} = C_N N_{60}$ onde $C_N = \sqrt{\frac{100}{\sigma_{v0}}}$
	6-10 m	0,95	mm	1,05	
	4-6 m	0,85	150 mm	1,15	
	3-4 m	0,75	200 mm		

• Procedimento recorrido para a determinação do módulo de distorção

Após a obtenção de $(N_1)_{60}$, este pode ser correlacionado com inúmeras parâmetros mecânicos, como o potencial de liquefacção de areias ou a consistência das argilas, etc. No caso do solo que se pretendeu modelar, o parâmetro fundamental para o desenvolvimento da malha, a obter por correlação com $(N_1)_{60}$ foi o módulo de distorção G_0 ou G_{max} . O módulo de distorção é pois o parâmetro mais relevante na influência da propagação das ondas e resultantes vibrações. A partir deste foi então possibilitada a subdivisão dos estratos, com uma profundidade mais relevante, por obtenção de distintos módulos de elasticidade através da equação:

$$E = G_0 \times 2(1 + \nu) \quad (5.1)$$

O procedimento que permitiu a obtenção do módulo de distorção, passou por numa primeira fase determinar o índice de compacidade (I_D), a partir de uma correlação do $(N_1)_{60}$ com o I_D proposta por Skempton. Este índice de compacidade (I_D), também designado de densidade relativa (D_r), permitiu a obtenção de um coeficiente empírico $K_{2, \text{Max}}$ que pôde ser utilizado na determinação do módulo cortante através da seguinte expressão proposta por Seed & Idriss [3]:

$$G_{m\acute{a}x} = 1000 K_{2, \text{max}} \sqrt{\sigma'_m} \quad (5.2)$$

De seguida pode-se visualizar o quadro 5.3 que correlaciona o coeficiente empírico com a densidade relativa:

Quadro 5.3 – Relação entre a densidade relativa com o coeficiente empírico utilizado na fórmula empírica de determinação do módulo cortante

$D_r(\%)$	$K_{2, \max}$
30	7,4
40	8,8
50	9,4
60	11,4
75	12,9
90	15,2

- Apresentação da tabela-resumo dos parâmetros mecânicos do solo

A tabela de cálculo realizada para a determinação do G_0 e E do solo a partir dos resultados do ensaio SPT, foi remetida para anexo (ANEXO A1). A disposição das grandezas encontra-se obviamente associada a cada estrato do terreno. Por análise do quadro 5.4 pode-se ainda denotar que a camada correspondente à rocha decomposta é subdividida em três distintas camadas, uma das quais não apresenta as interfaces de separação com as outras camadas vizinhas com orientação horizontal, mas sim vertical. Este facto justifica-se pelo ensaio SPT ter sido realizado em três locais distintos ao longo do corte longitudinal do edifício, pelo que foi averiguado que as medições eram bastantes discrepantes adoptando-se consequentemente e por simplificação esta interface vertical. Por comparação da tabela em anexo (ANEXO A1), depara-se ainda com valores do módulo de elasticidade distintos dos representados abaixo, que se deve unicamente a arredondamentos realizados para o módulo de elasticidade.

Quadro 5.4 – Tabela-resumo dos parâmetros mecânicos das distintas camadas constituintes do solo

Tipo de solo	E (kPa)	ν	G (kPa)	γ (kN/m ³)	ρ (t/m ³)
Aterro	15000	0,4	5357,14	19	1,94
Aluviões areia	10000	0,45	3448,28	18	1,83
Aluviões fluviais areia	20000	0,25	8000,00	19	1,94
Rocha decomposta	400000	0,22	163934,43	20	2,04
	210000	0,22	86065,57	20	2,04
	250000	0,22	102459,02	20	2,04
Rocha alterada	530000	0,2	220833,33	22	2,24
Rocha dura	1000000	0,15	434782,61	24	2,45

5.3.2. PARÂMETROS MECÂNICOS DA ESTRUTURA PORTICADA

- Apresentação da tabela-resumo dos parâmetros mecânicos do betão:

Quadro 5.5 – Parâmetros mecânicos do betão utilizado na concepção da estrutura porticada

Material utilizado na concepção da estrutura porticada	E (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)
Betão	33	0,3	2500

5.4. GEOMETRIA, MALHA E CONDIÇÕES FRONTEIRA

Inicialmente a geometria do modelo foi retirada da secção geotécnica fornecida, no entanto, todas elas, desde a distância dos laboratórios à faixa de rodagem, às espessuras dos estratos do solo, necessitaram de comportar algumas alterações através da introdução de aproximações dos valores que permitissem a inserção de um determinado número de elementos aquando a geração da malha do solo. Relativamente ao edifício foi admitida uma determinada secção geométrica para cada elemento estrutural, isto é para as vigas e para os pilares.

5.4.1. DIMENSÃO E TIPOLOGIA SELECIONADA PARA OS ELEMENTOS FINITOS

Anteriormente foi referido que a adopção de 8 elementos por cada comprimento de onda S , permitiria à resposta dinâmica uma precisão de 90%. Foi ainda considerada que esta seria uma boa opção já que não torna o modelo muito pesado, dotando-a de uma análise com precisão razoável. A dimensão de cada elemento da malha foi então determinada através da equação:

$$\lambda/8 = (C_s/f_{max})/8 \quad (5.3)$$

onde $C_s = \sqrt{G/\rho}$ e f_{max} é a frequência máxima das vibrações suscitadas pelos veículos pesados. Esta f_{mas} de excitação, foi tomada com um valor de 20Hz já que as frequências de vibração dos veículos pesados usualmente não excedem este valor. A tabela que se segue exhibe os valores das dimensões dos elementos unitários da malha, de acordo com os parâmetros mecânicos de cada estrato do terreno pelo qual são propagadas as vibrações induzidas.

Quadro 5.6 – Dimensão de cada elemento finito para elaboração da malha

Tipo de solo	G (kPa)	ρ (t/m ³)	C_s (m/s)	λ (m)	$\lambda/8$ (m)
aterro	5357.14	1,94	52,59	2,63	0,33
Aluviões areia	3448.28	1,83	43,35	2,17	0,27
Aluviões fluviais areia	8000.00	1,94	64,27	3,21	0,40
Rocha decomposta	163934.43	2,04	283,57	14,18	1,77
	86065.57	2,04	205,46	10,27	1,28
	102459.02	2,04	224,18	11,21	1,40
Rocha alterada	220833.33	2,24	313,80	15,69	1,96
Rocha dura	434782.61	2,45	421,57	21,08	2,63

Devido à geometria irregular de cada estrato optou-se pela simplificação de determinada em determinada profundidade se adoptar uma dimensão aproximadamente concordante com os valores indicados na tabela acima.

Quadro 5.7 – Valores adoptados para a dimensão de cada elemento finito da malha

z (m)	Valor adoptado para a dimensão de cada elemento finito	
	espaçamento transversal (m)	espaçamento longitudinal (m)
177	0.3	0.3
171	0.6	0.3
162	1.2	0.3
157.2	2.4	0.3
118.8		

Tal como foi referido, a geometria das camadas de solo foi adaptada de forma a integrar um determinado número inteiro de elementos na malha.

5.4.2. GEOMETRIA – SIMPLIFICAÇÕES

As dimensões referentes à geometria da estrutura porticada apresentam-se no quadro que se segue:

Quadro 5.8 – Geometria da estrutura porticada

	Pilar	Viga
b (m)	0.152	1
h (m)	0.3	0.32
A (m ²)	0.046	0.320

Pelo facto do estudo ter sido realizado em 2D, a análise foi determinada por metro linear de desenvolvimento do modelo, pelo que foi necessário adaptar as dimensões do pilar a esta dimensão.

Relativamente à malha do solo, e após definidas as dimensões de cada um dos elementos seus constituintes, foi possível a obtenção da geometria de cada camada do solo através da consideração de simplificações aplicadas sobre a secção geotécnica fornecida. Para uma melhor percepção da geometria adoptada para o solo e ensoleiramento encontra-se remetida em anexo (ANEXO A5) um esquema com o respectivo número de elementos inserido em cada estrato.

Foi ainda necessário ter em consideração que devido à reduzida capacidade resistente ao corte dos primeiros estratos, para que os resultados obtidos determinassem uma situação realista, procedeu-se a uma “remoção” da camada referente ao aterro, bem como à substituição das duas camadas seguintes constituídas na sua maioria por areia fina e silte. Assim logo a seguir à cota preestabelecida para o assentamento do betão de limpeza, predefiniu-se que a camada referente ao micaxisto e migmatite decomposto conformava-se contígua à cota de implantação do edifício. O mesmo se reproduziu para a camada subjacente às camadas que constituem os pavimentos da via, já que devido à reduzida capacidade de resistência ao corte, estas teriam necessariamente que ser removidas ou melhoradas através de técnicas de compactação ou de melhoramento do solo.

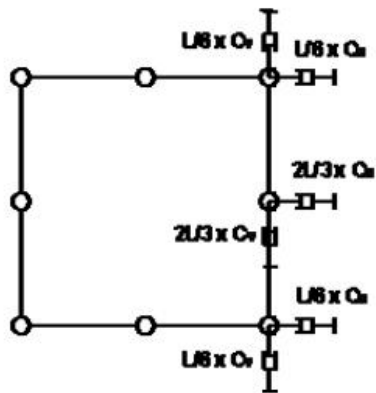
5.4.3. CONDIÇÕES FRONTEIRA

5.4.3.1. Definição das diferentes tipologias de fronteiras a implementar

No capítulo anterior, este tema foi abordado, a esclarecendo alguns aspectos e conceitos um pouco teóricos. Agora pretendendo uma vertente mais prática sobre as condições fronteira a implementar, são explicitadas como cada uma delas pode ser simulada:

- Condição de simetria: deslocamento segundo a direcção x nulo;
- Condição fronteira rígida: deslocamento segundo a direcção y nulo;
- Amortecedores a implementar no bordo esquerdo do modelo, isto é nos últimos nós a receberem a solicitação dinâmica: definição do amortecimento ao nível de cada nó.

O caso dos amortecedores foi de mais complexa inserção relativamente às restantes condições fronteira, visto ter sido necessário dotar o modelo de nós auxiliares que impediam os movimentos. Estes nós auxiliares fazem parte, conjuntamente com os nós fronteira, dos elementos que simulam a condição de radiação perfeita. A adicionar a este facto, foi necessário determinar o comprimento de influência de cada um destes amortecedores, que não é sempre o mesmo já que nas fronteiras de elementos com dimensões distintas é necessário ponderar o seu comprimento de influência. A figura que se segue, permite entender melhor a forma como estes são inseridos nos nós fronteira do modelo.

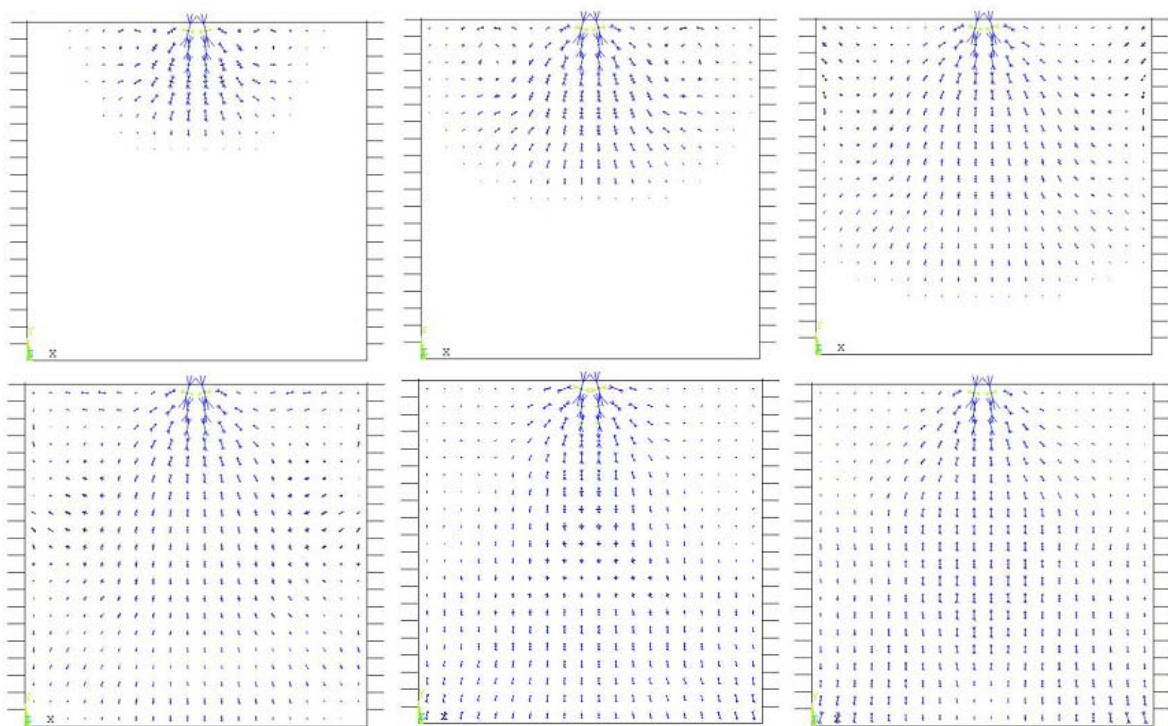


$$C_n = \frac{8\sqrt{\rho G}}{15\pi} \times \left(\frac{5}{s} - 2s + 2 \right) \quad (5.4)$$

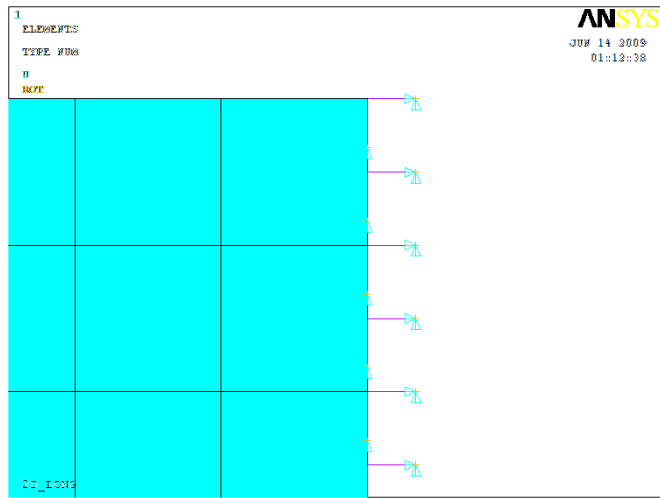
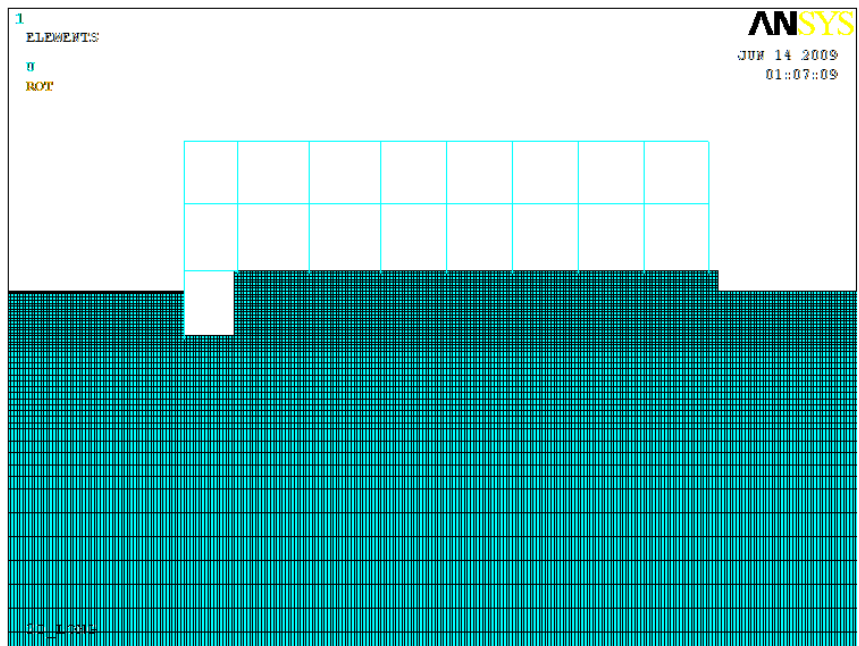
$$C_t = \frac{8\sqrt{\rho G}}{15\pi} \times (4 + s) \quad (5.5)$$

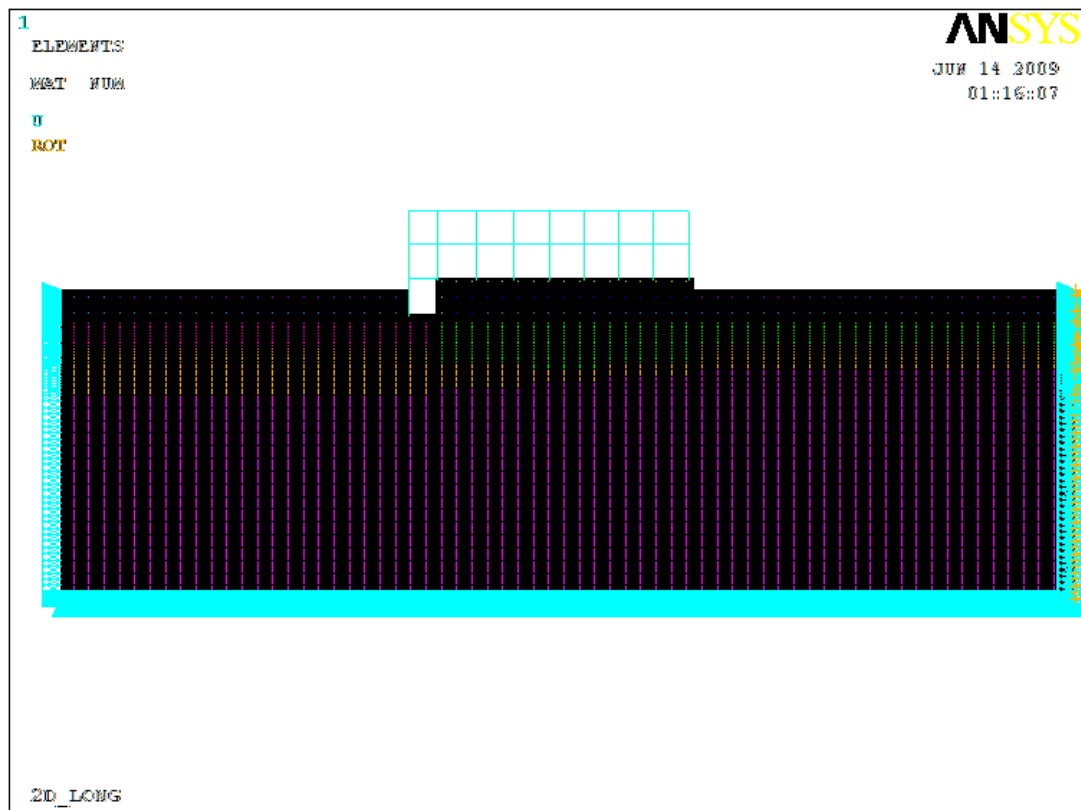
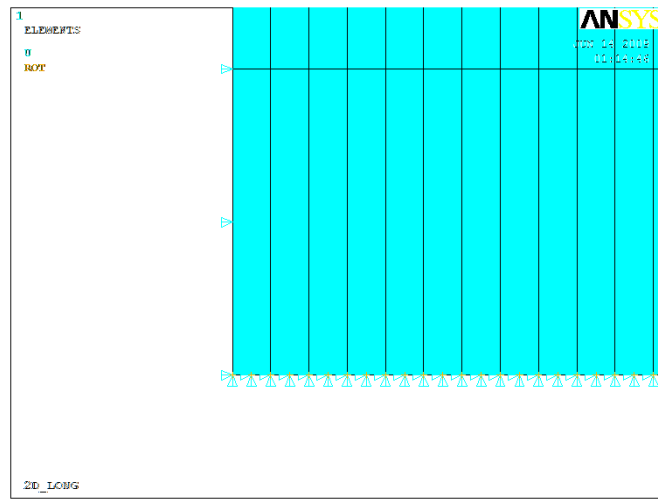
$$s = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}$$

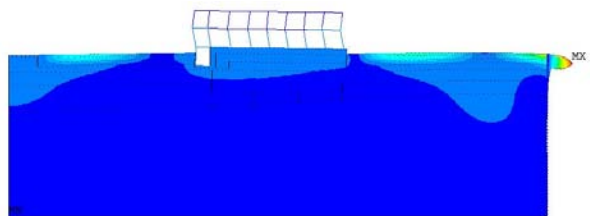
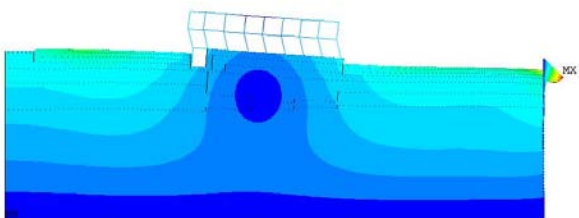
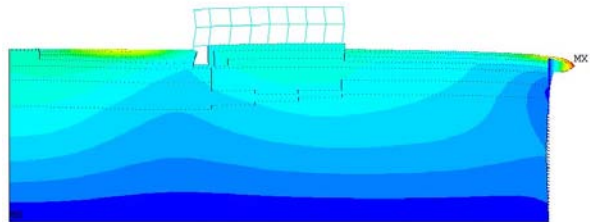
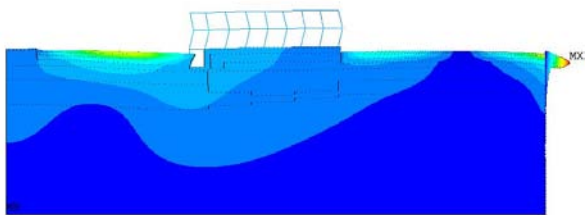
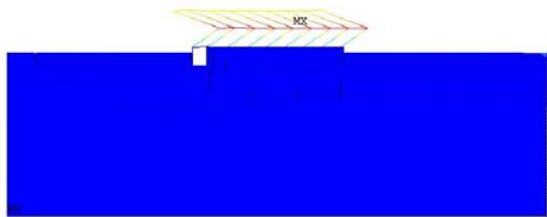
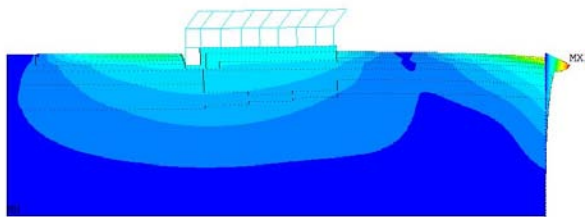
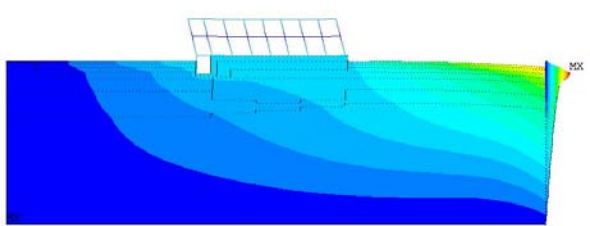
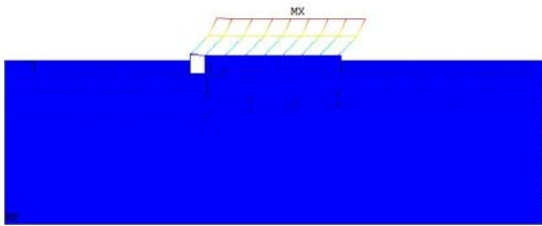
Tipo de solo	s	Cn	Ct
aterro	0,41	232254,73	65996,76
Aluviões areia	0,30	242797,24	48654,01
Aluviões fluviais areia	0,58	200869,30	87796,23
	0,60	897718,70	412037,6
Rocha decomposta	0,60	650459,00	298549,6
	0,60	709708,95	325744,3
Rocha alterada	0,61	1068086,09	504729,3
Rocha dura	0,64	1489745,51	749967,5

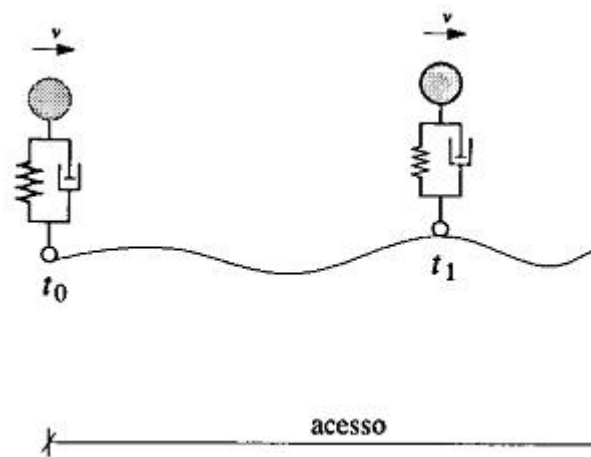
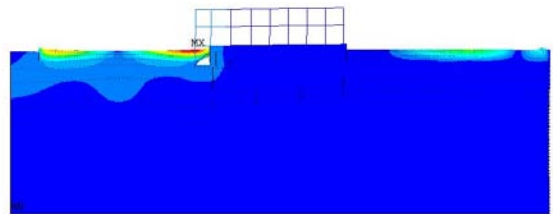
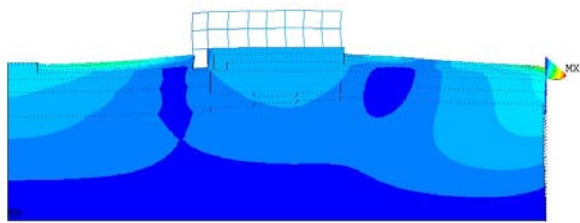












O coeficiente de amplificação dinâmica é responsável pelo incremento relativo da resposta dinâmica em relação à resposta estática, pelo que:

$$R_{dyn} = R_{sta}(1 + DA) \quad (5.6)$$

onde $(1+DA)$ é o factor de amplificação dinâmica.

Este coeficiente de amplificação dinâmica fornece, quando multiplicado pela resposta estática, a componente dinâmica da força solicitadora ao longo do tempo.

Por último, foi então realizado o cômputo da solicitação a induzir no modelo.

5.5.2. PARÂMETROS INFLUENTES NA SOLICITAÇÃO DINÂMICA

Inúmeros são os parâmetros envolvidos na resposta dinâmica induzida pelo tráfego ao solo. Com os itens que se seguem pretendeu-se conhecer alguns dos parâmetros por forma a permitir a quantificação das forças induzidas pelos camiões.

5.5.2.1. Parâmetros relativos ao pavimento – Irregularidades distribuídas

O perfil das irregularidades é usualmente idealizado como uma realização de um processo estocástico estacionário que pode ser descrito probabilisticamente pela correspondente função densidade espectral de potência. A medição das irregularidades existente no pavimento de uma via, pode ser determinada através do recurso a um varrimento especial com um laser apropriado. Posteriormente, a partir das medições registadas, é realizada a determinação de estimativas da função densidade espectral de potência da irregularidade [15].

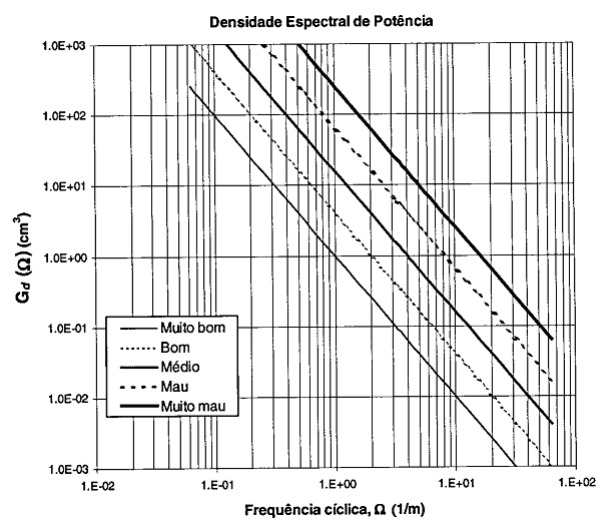
Segundo a proposta da comissão ISO/TC 108, a função densidade espectral de potência da irregularidade é dada pela seguinte relação:

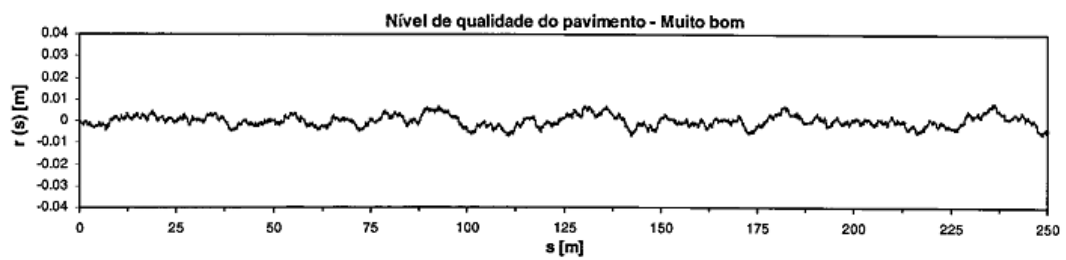
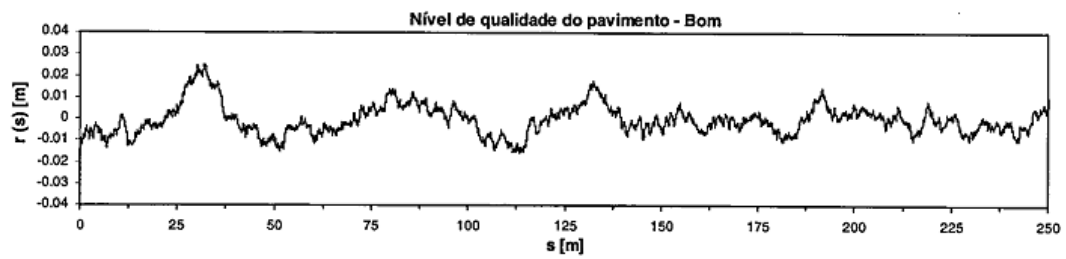
$$G_d(\Omega) = G_d(\Omega_0) \times \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{-w} \quad (5.7)$$

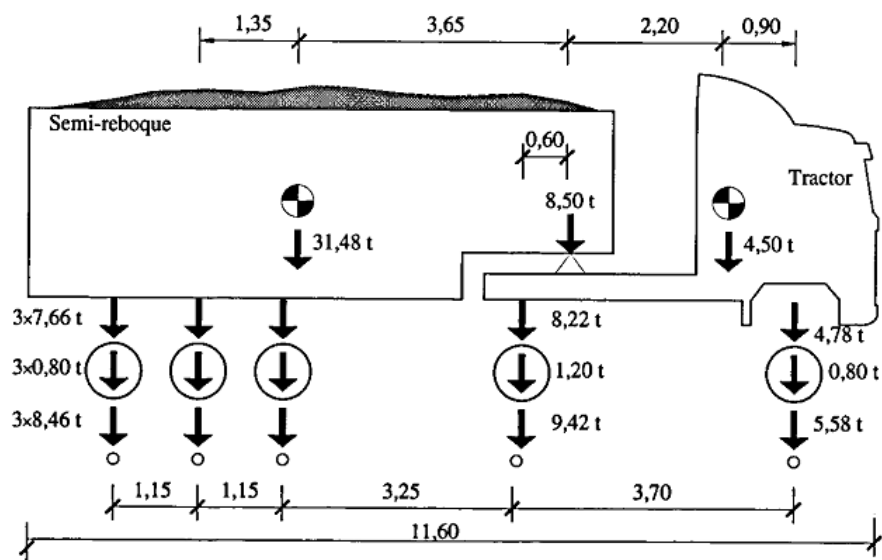
em que Ω é frequência espacial cíclica da irregularidade ($\Omega=2\pi n$, onde $n=1/\lambda$ e λ o comprimento de onda da irregularidade).

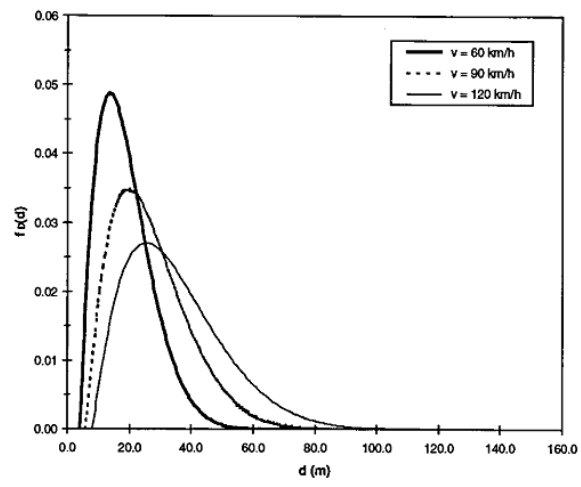
Assumindo que $\Omega = 1 \text{ m}^{-1}$ e $w = 2$, os valores do coeficiente de irregularidade $G_d(\Omega_0)$ dados para diferentes níveis de qualidade do pavimento apresentam-se, de acordo com a proposta da comissão ISO/TC 108, no quadro que se segue:

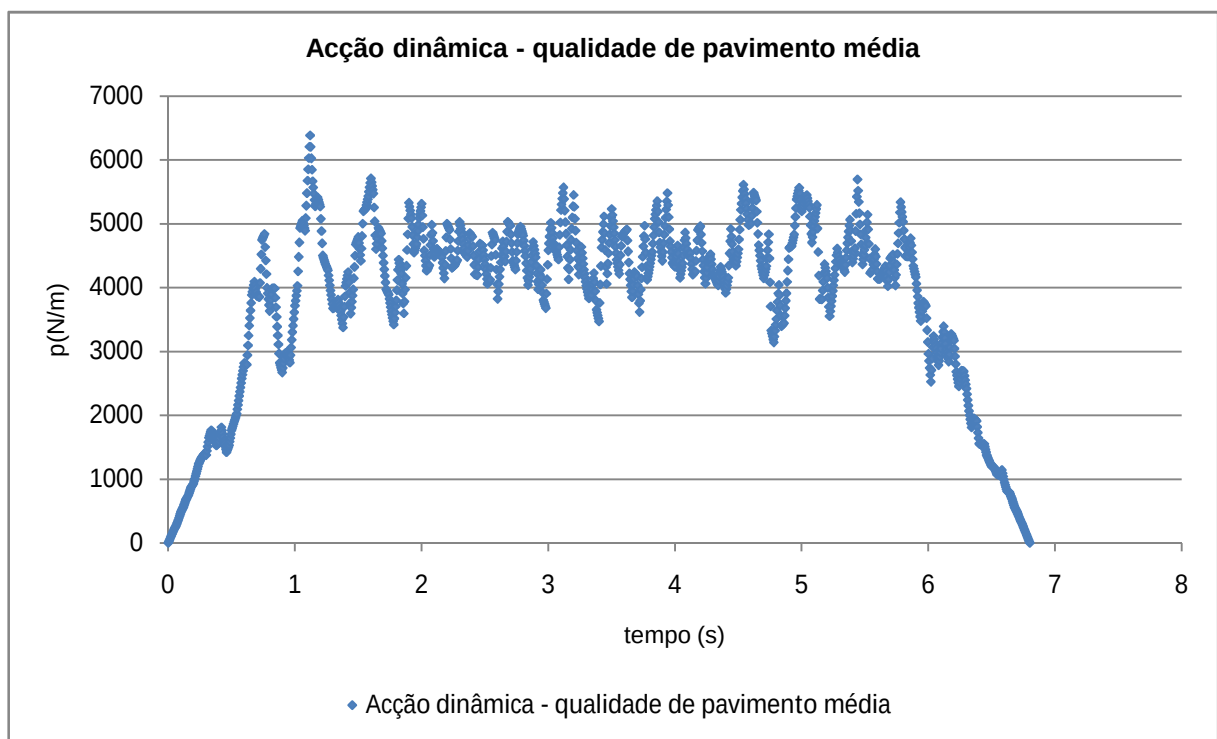
Nível de qualidade do pavimento	$G_d(\Omega_0) \text{ (cm}^3\text{)}$		
	Limite inferior	Valor médio	Limite superior
Muito Bom	0,5	1	2
Bom	2	4	8
Médio	8	16	32
Mau	32	64	128
Muito Mau	128	256	512

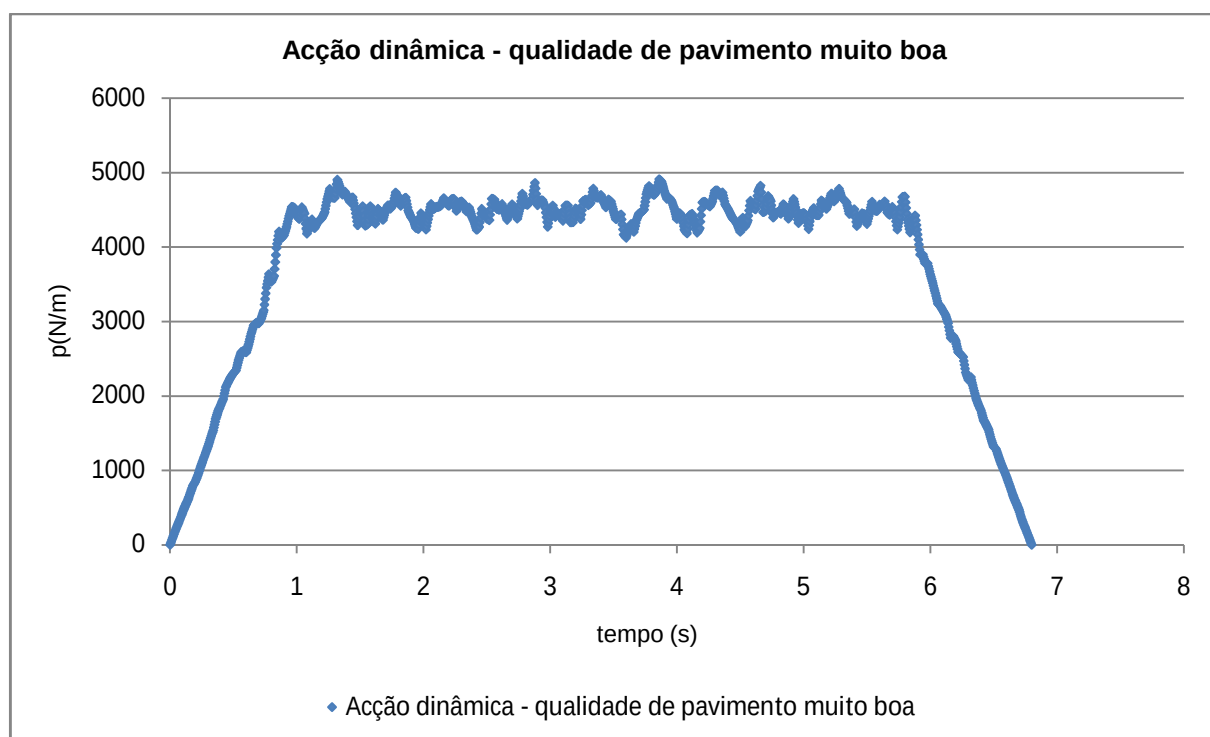
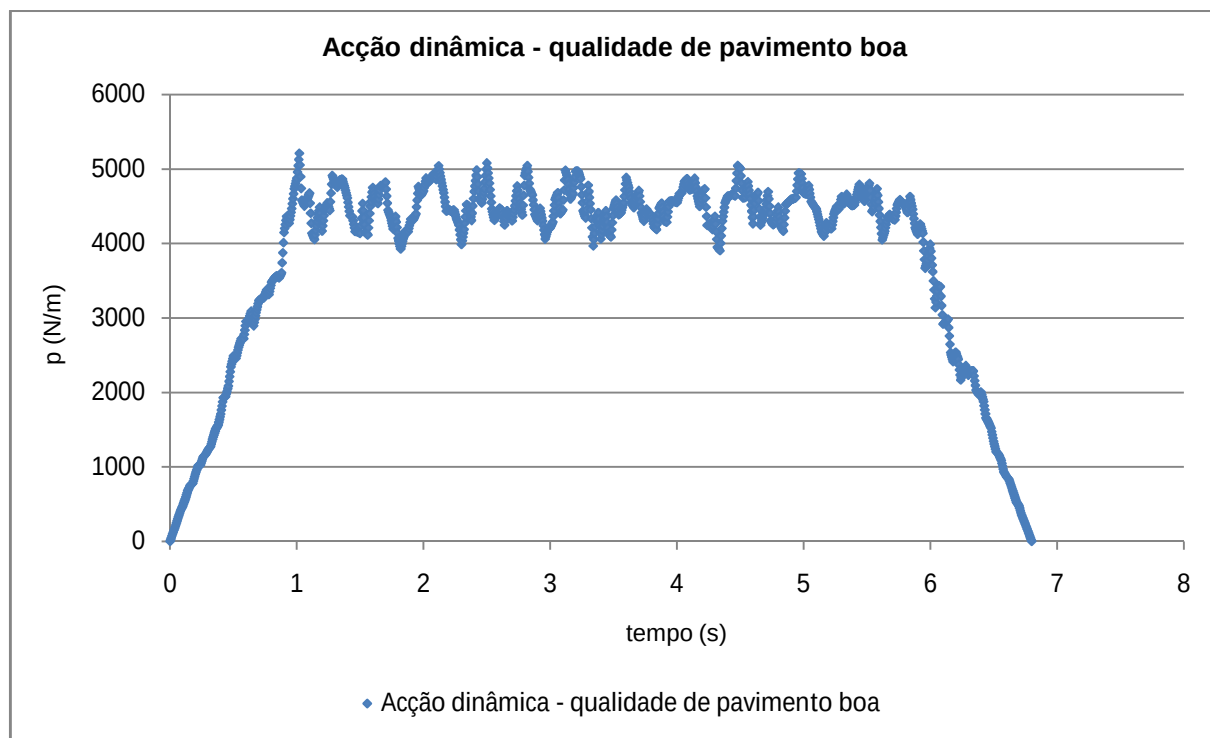












6

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE
RESULTADOS

6.1. INTRODUÇÃO

Durante este capítulo é facultada a análise realizada pelo software, à qual se segue, para cada um dos cenários estudados, uma crítica construtiva incidente sobre os resultados obtidos, tendo por base os valores atribuídos pelo critério genérico de vibração, averiguando consequentemente a aplicabilidade de cada laboratório à actividade laboratorial estipulada em projecto. Foi também objecto de análise, a fiabilidade da precisão e exactidão dos resultados facultados pelo modelo elaborado, averiguando a existência ou não de problemas intrínsecos, tais como a eficiência do modelo para representar o comportamento do sistema, o nível de descritização, as técnicas numéricas utilizadas e os tipos de elementos utilizados. Entenda-se que tais factores que asseguram a fiabilidade e precisão são muitas das vezes prejudicados em detrimento da economia de tempo para a fase de processamento da análise.

6.2. PARÂMETROS A INTRODUIR NO ANSYS NA ANÁLISE TRANSITÓRIA

Segundo o método de integração numérica adoptado, isto é o método de Newmark, foi necessário estabelecer qual o intervalo de tempo de integração que assegura a precisão do método. Inicialmente foi enunciado que é corrente adoptar intervalos $\Delta t = T_n/10$, pelo que para uma frequência máxima de excitação de 20Hz consagrada para veículos pesados, obteve-se um intervalo Δt de 0,005s.

Outros dois dados de inserção no programa para a realização da análise transitória, foram os parâmetros α e β para a definição da matriz de amortecimento de Rayleigh. Para o seu cômputo, foram necessárias duas frequências de vibração bastante discrepantes, conforme o preconizado na figura 4.3, para a obtenção da matriz de amortecimento de Rayleigh, a partir da ponderação da matriz de rigidez com a matriz de massa. Assim para obter w_2 , optou-se pela frequência máxima de excitação de 20Hz, enquanto que para w_1 foi adoptado o valor da frequência do primeiro modo de vibração do sistema, obtido por análise modal.

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = 2 \frac{2\pi 0,8834 \times 2\pi 20}{(2\pi 20)^2 - (2\pi 0,8834)^2} \begin{Bmatrix} 2\pi 20 & -2\pi 0,8834 \\ 1/2\pi 20 & 1/2\pi 0,8834 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 0,03 \\ 0,03 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0,318932 \\ 0,00045727 \end{Bmatrix} \quad 5.8$$

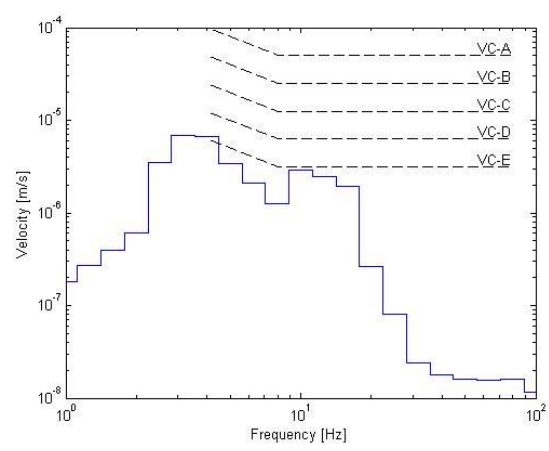
6.3. CENÁRIOS DE ANÁLISE

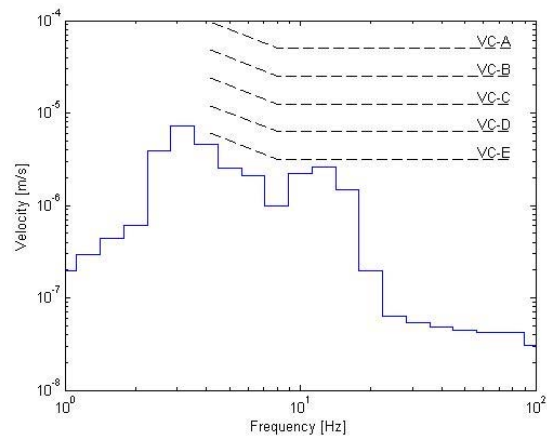
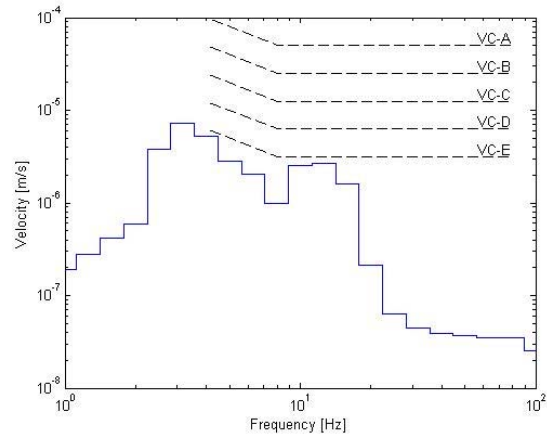
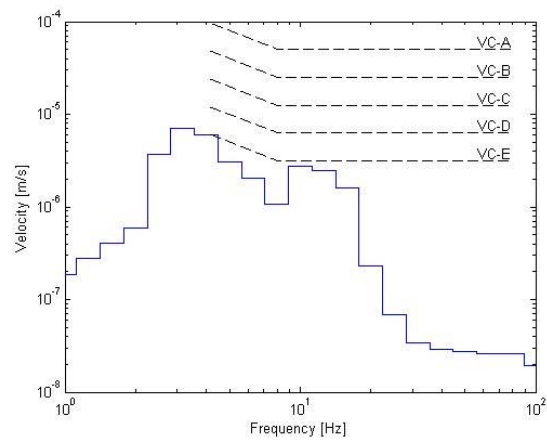
Para o trabalho foram realizados seis cenários distintos que permitissem inferir sobre comportamento do edifício face diferentes condições de solicitação. Assim foram estabelecidos três níveis de qualidade de pavimentos, um muito bom, um bom e um médio e duas solicitações, uma com a passagem de três camiões na via da direita e outra com a circulação de seis camiões, três em cada uma das vias localizadas mais à direita. Quanto à velocidade adoptada para simular a circulação dos veículos apenas se adoptou a de 60km/h. De seguida segue-se uma tabela resumo dos cenários simulados.

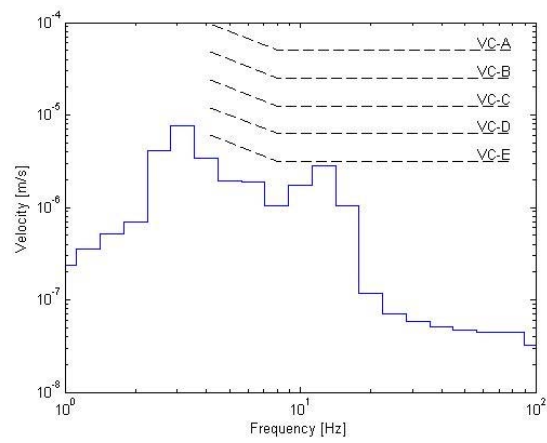
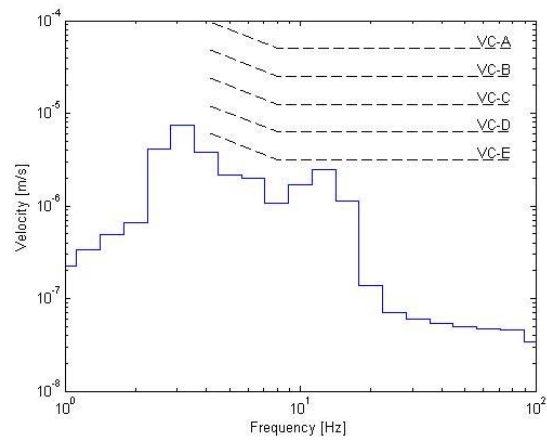
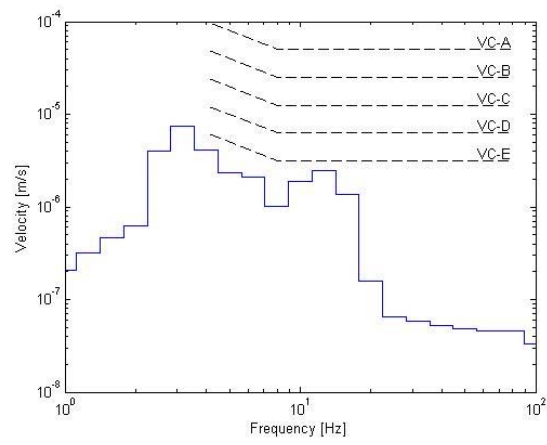
Quadro 6.1 – Cenários simulados

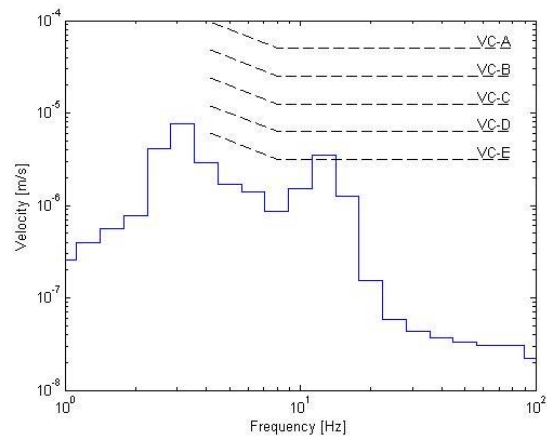
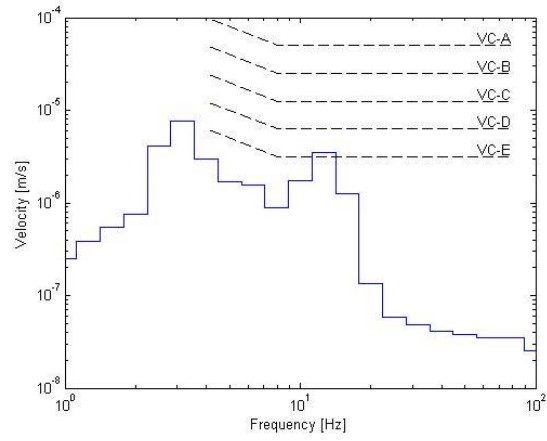
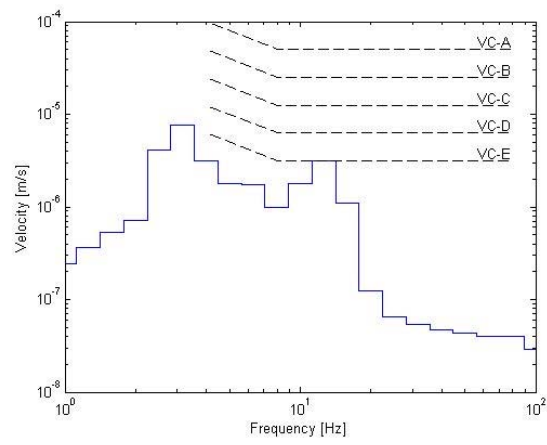
Cenário	Qualidade de pavimento			Solicitação	
	Muito bom	Bom	Médio	3 camiões na via da direita	6 camiões, 3 na via da direita e 3 na via do meio
1	x			x	
2		x		x	
3			x	x	
4	x				x
5		x			x
6			x		x

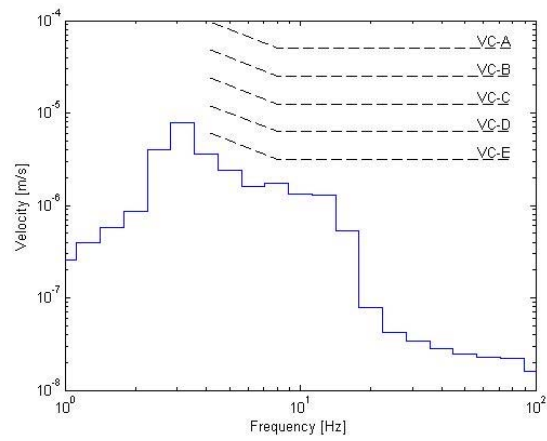
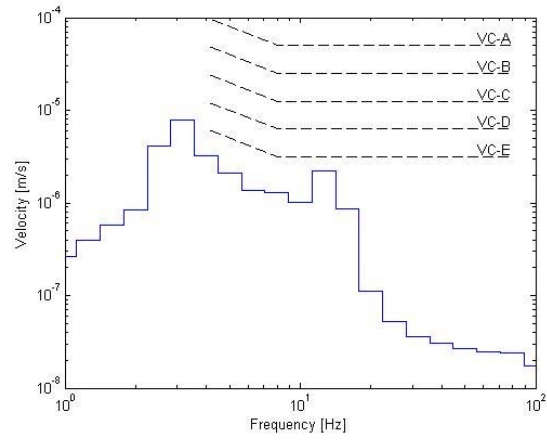
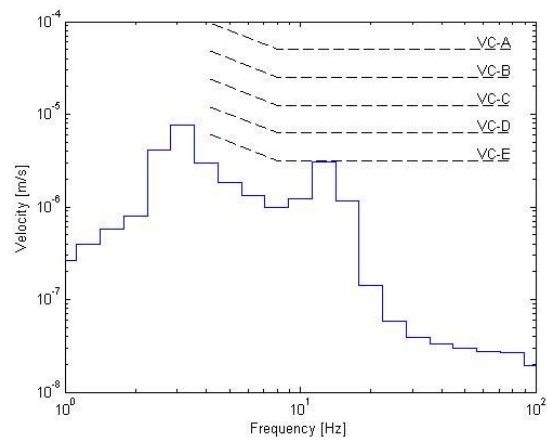
Quanto aos nós estudados, foram analisados os resultados obtidos para os nós localizados na interface do ensoleiramento com o edifício, mais especificamente os localizados na base de cada pilar e os intermédios a cada um dos tramos do pórtico, bem como os referentes ao piso 1. Estes resultados foram simultaneamente confrontados com os critérios genéricos de vibração a aplicar de acordo com o tipologia de investigação que pretendida para cada laboratório. De seguida afigura-se mais uma vez a planta, correspondente ao piso 0, com os respectivos critérios estabelecidos de acordo com as actividades pretendidas em cada um dos laboratórios. Quanto ao piso 1, que se estabeleceu para laboratórios gerais, este não deve estar sujeito a vibrações superiores a 50µm/s (VC-A).

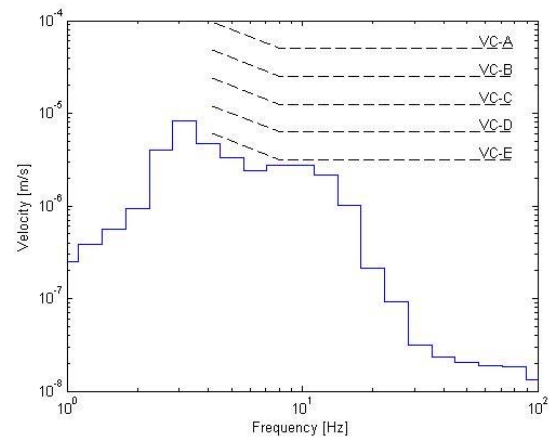
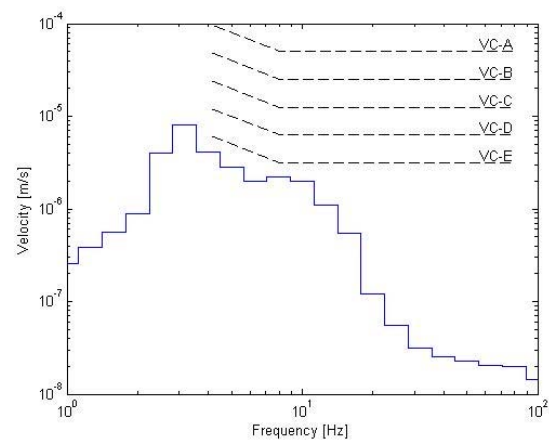


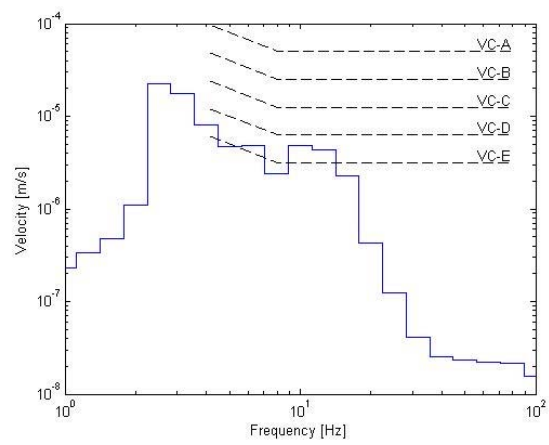
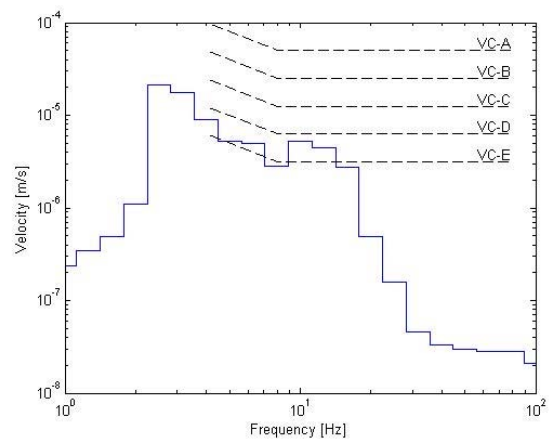


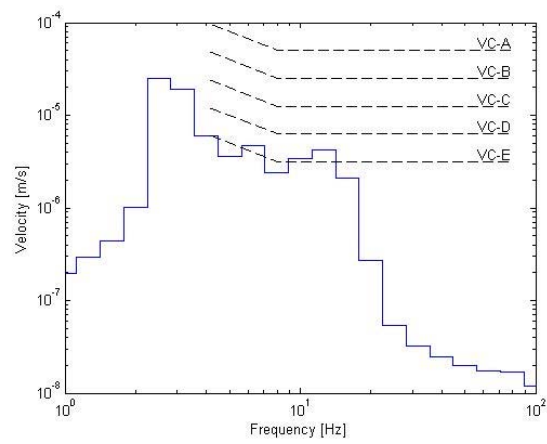
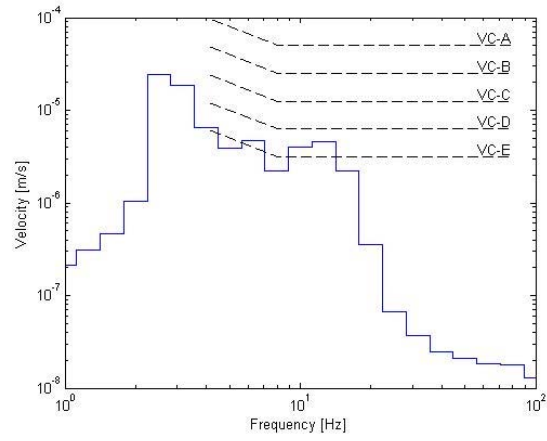
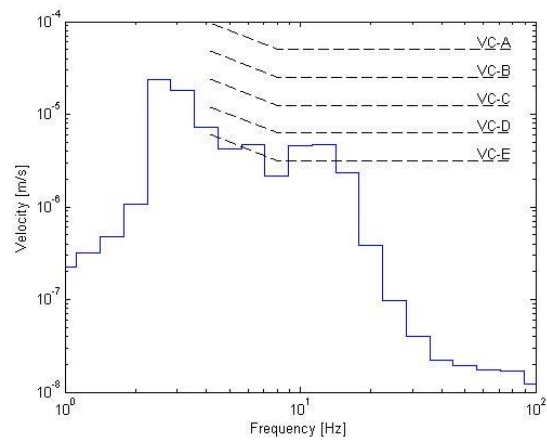


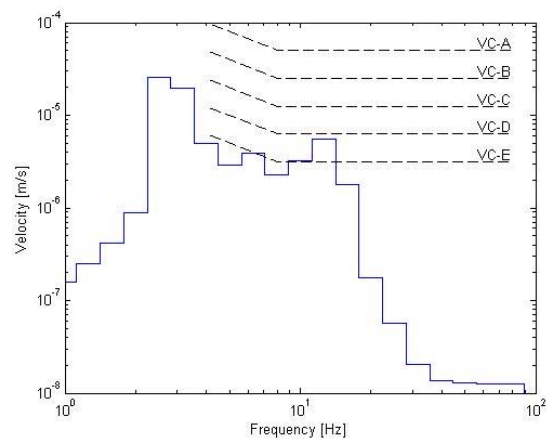
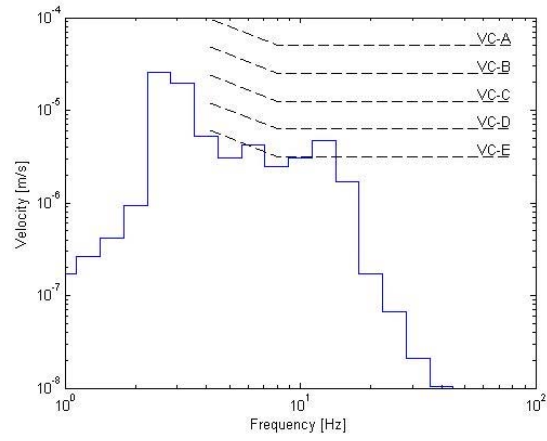
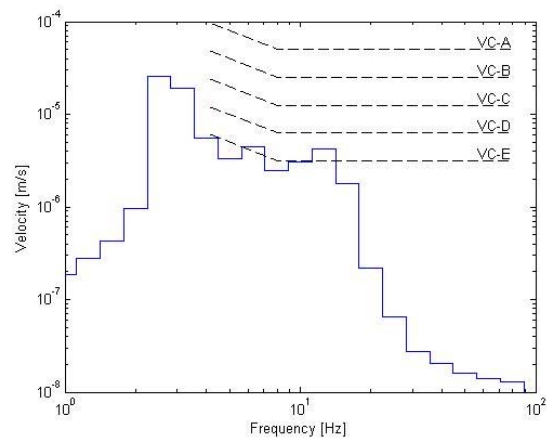


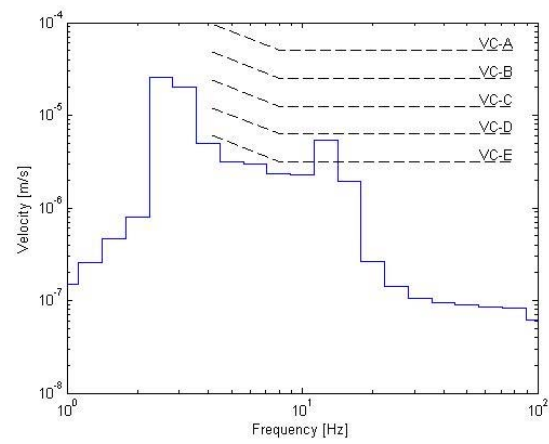
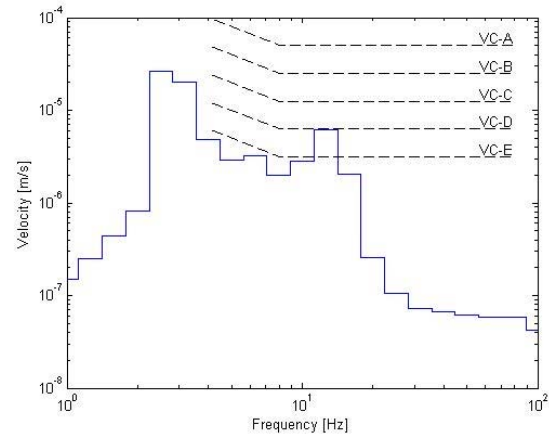
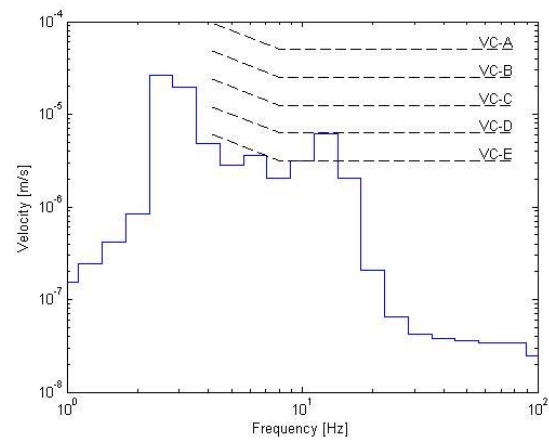


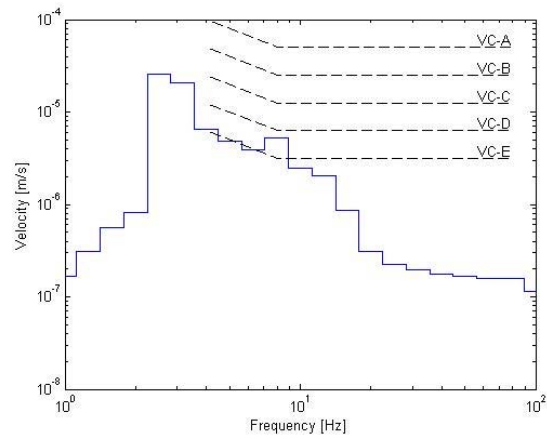
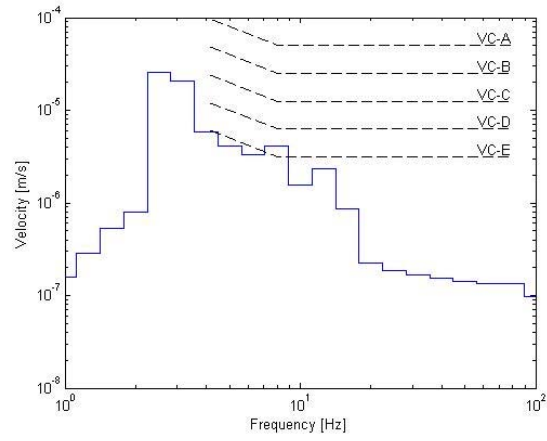
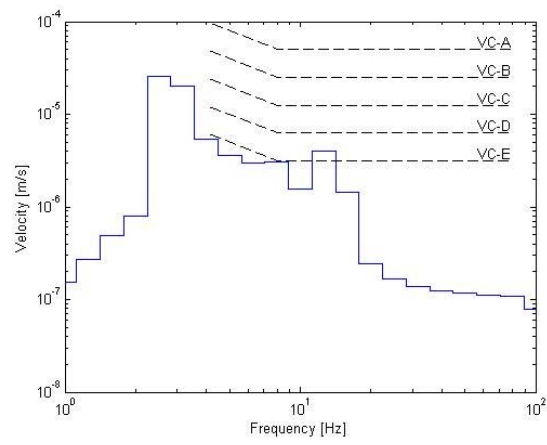


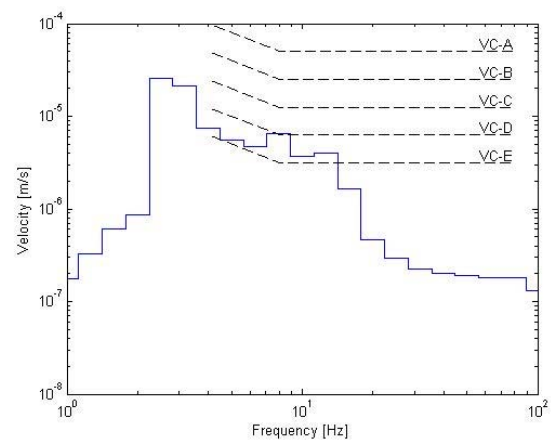


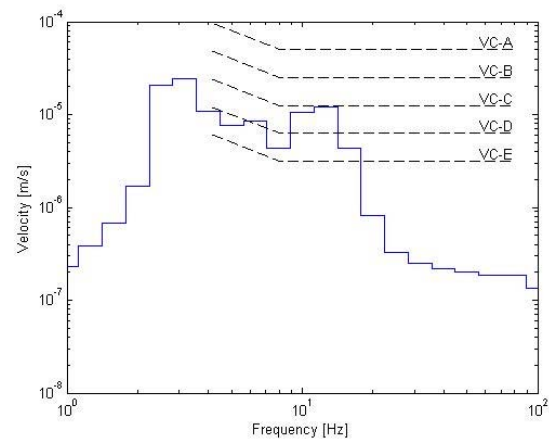
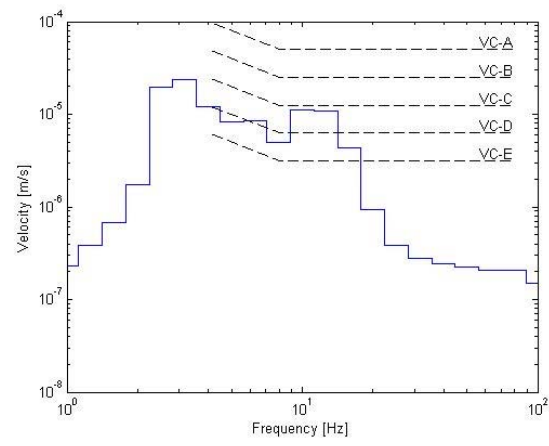
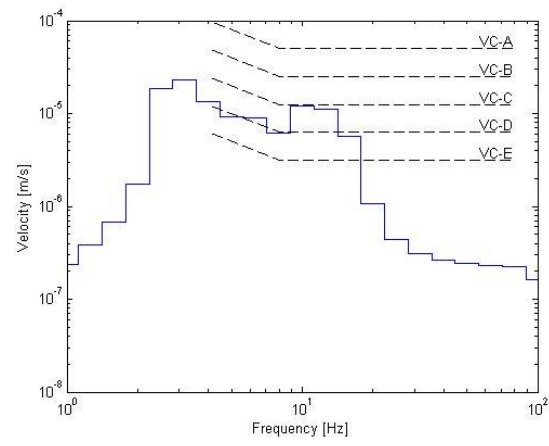


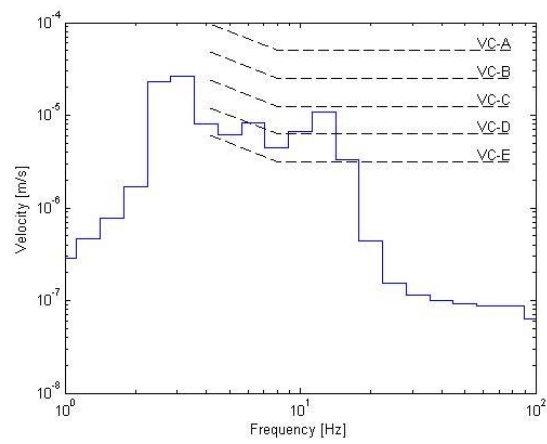
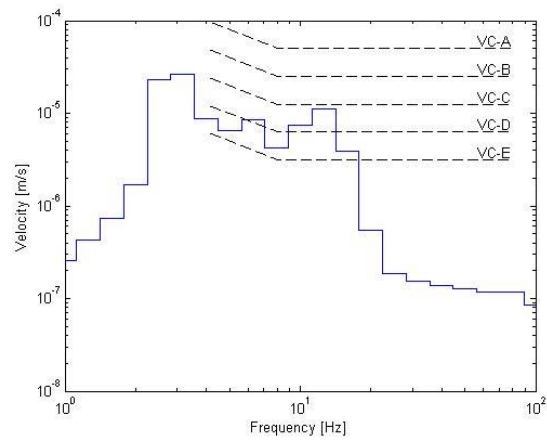
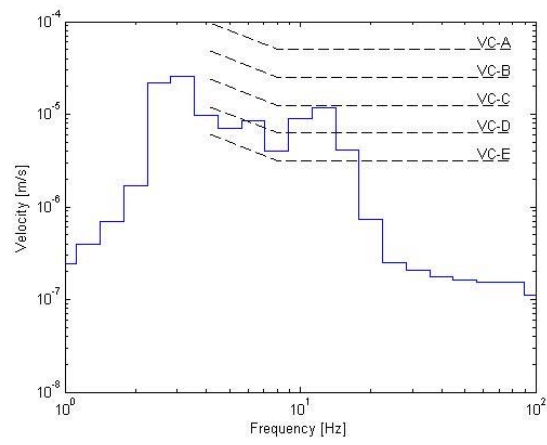


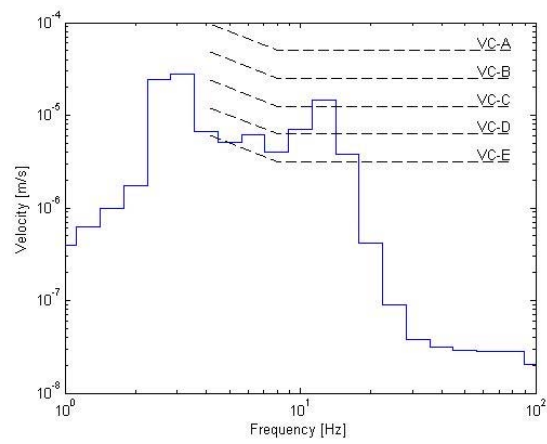
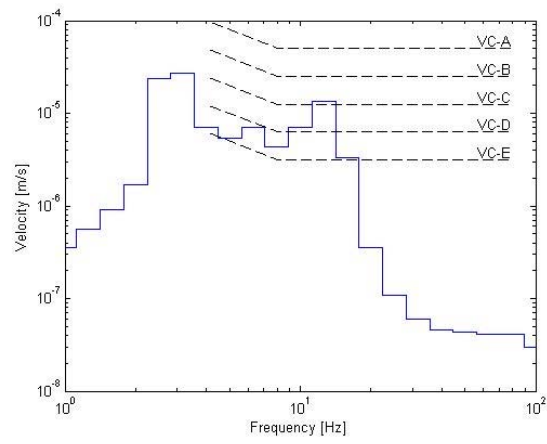
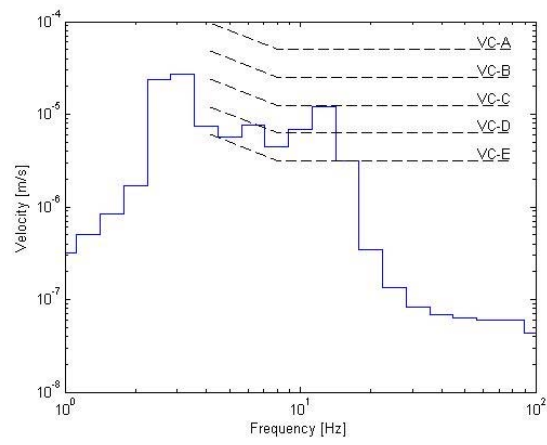


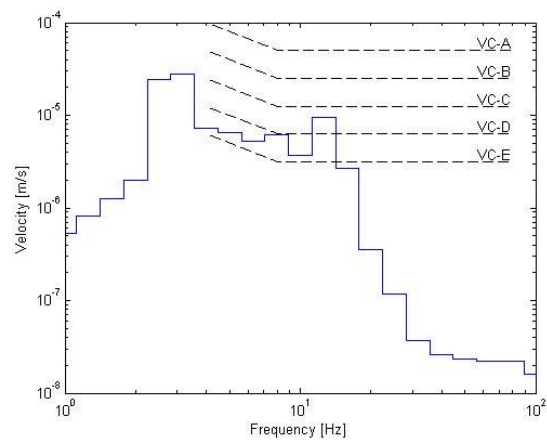
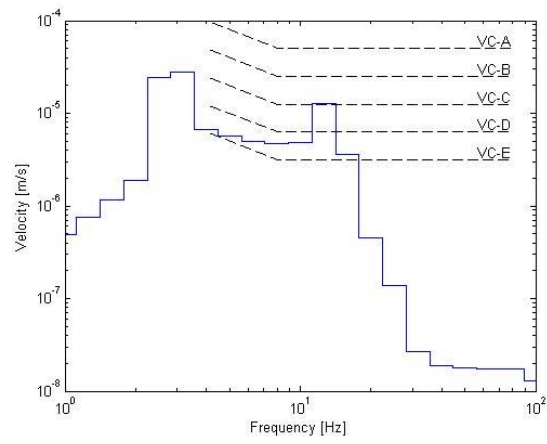
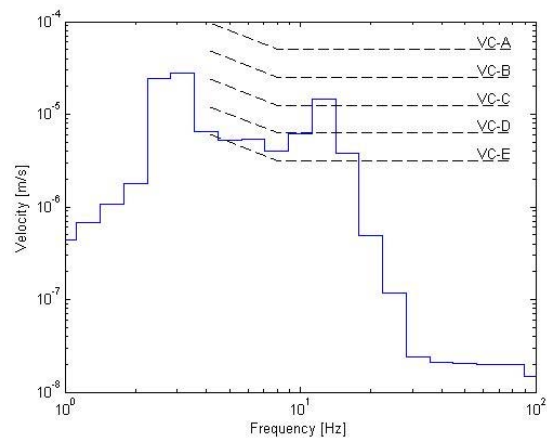


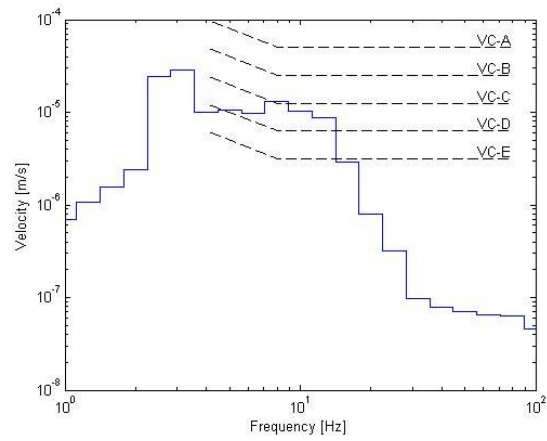
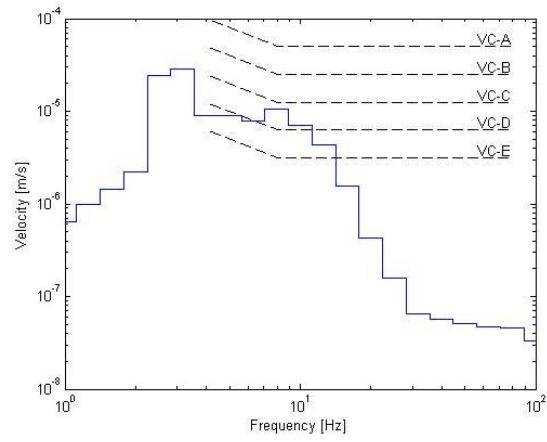
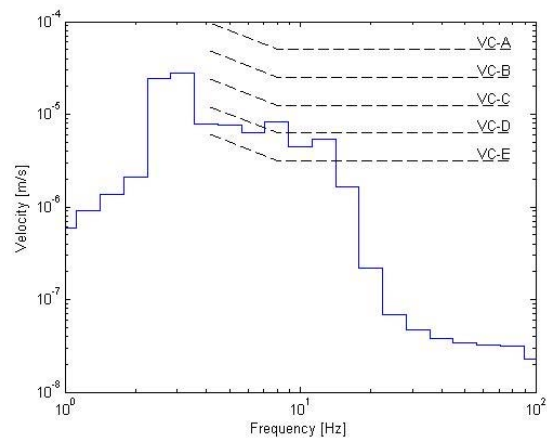


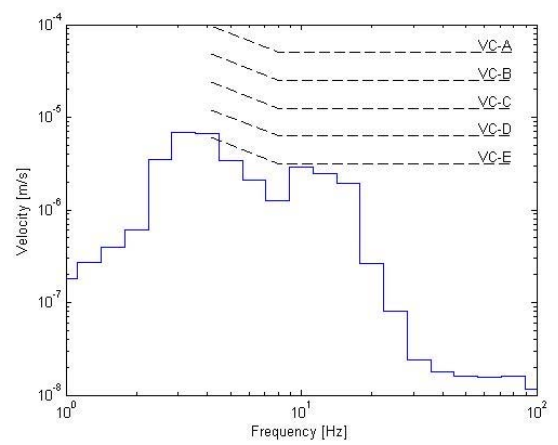
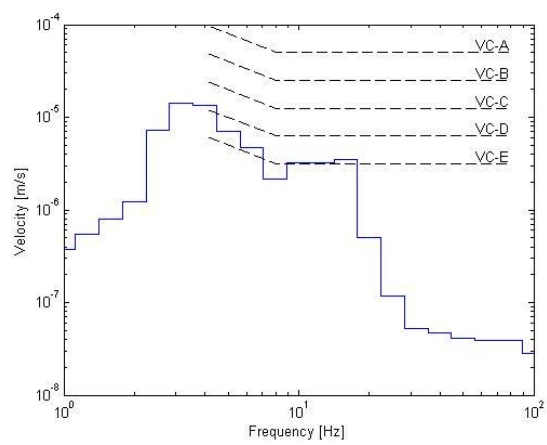


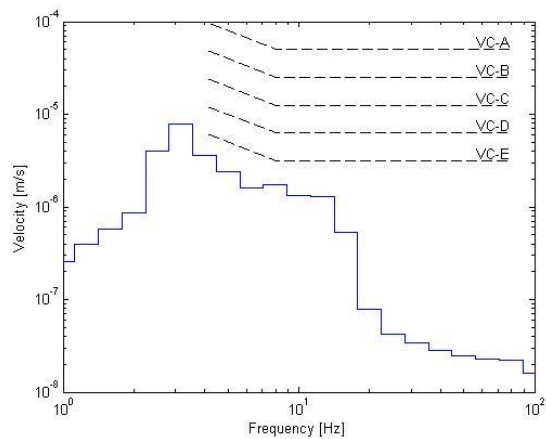
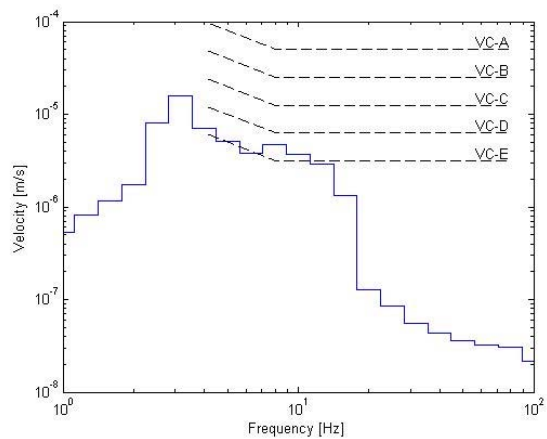
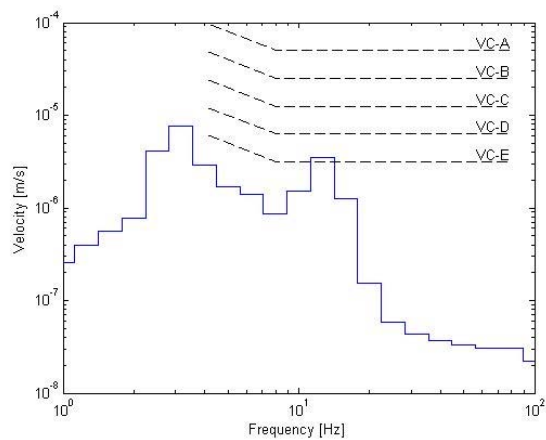
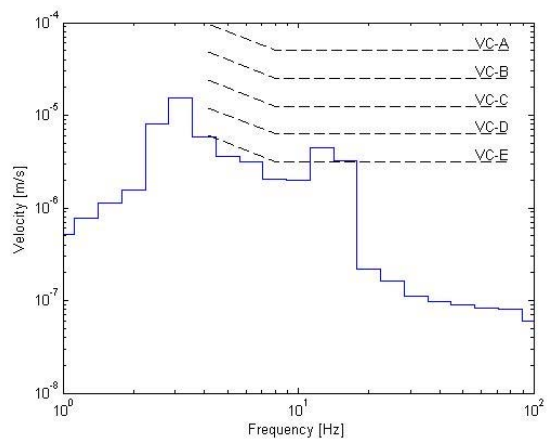
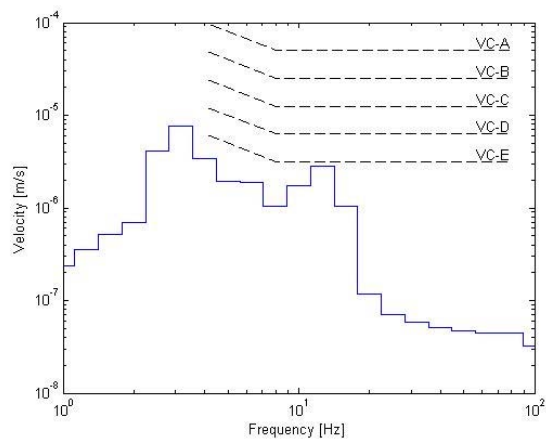
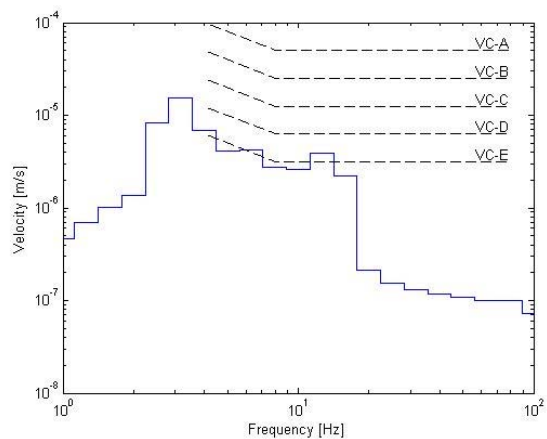


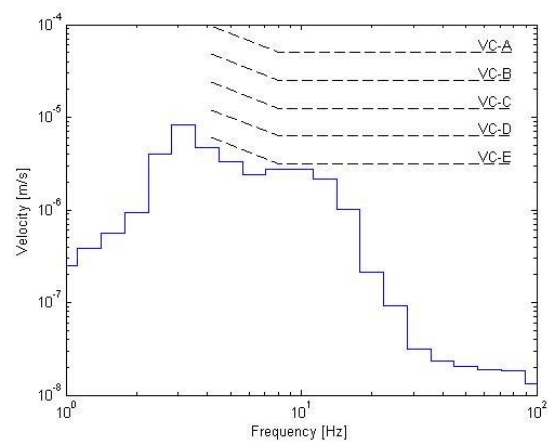
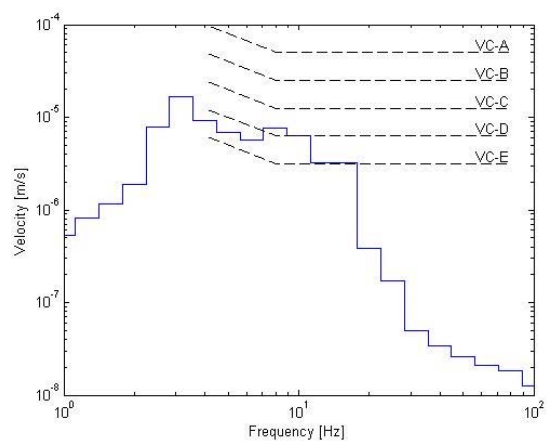


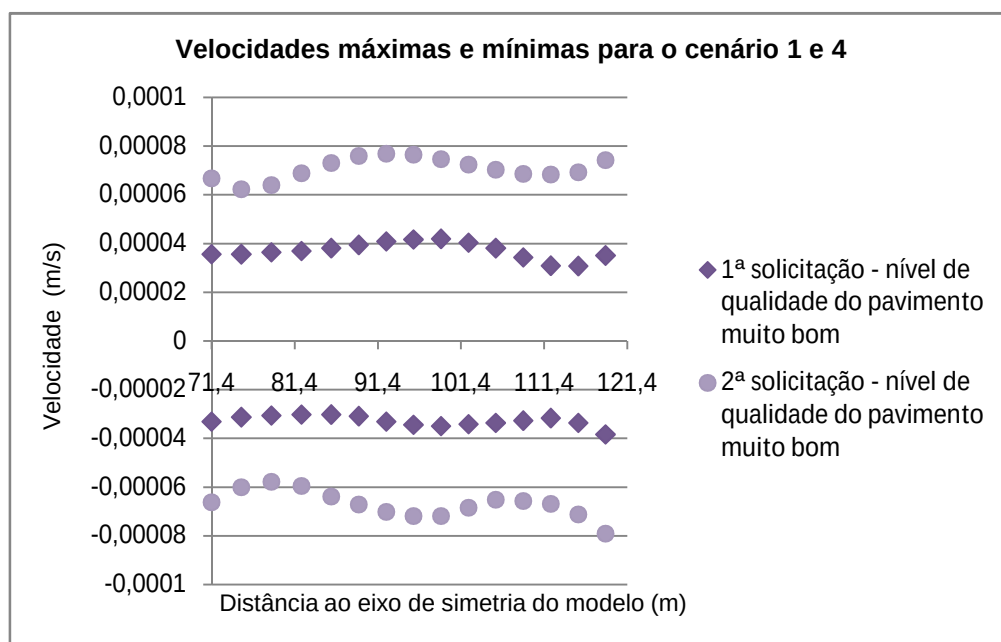
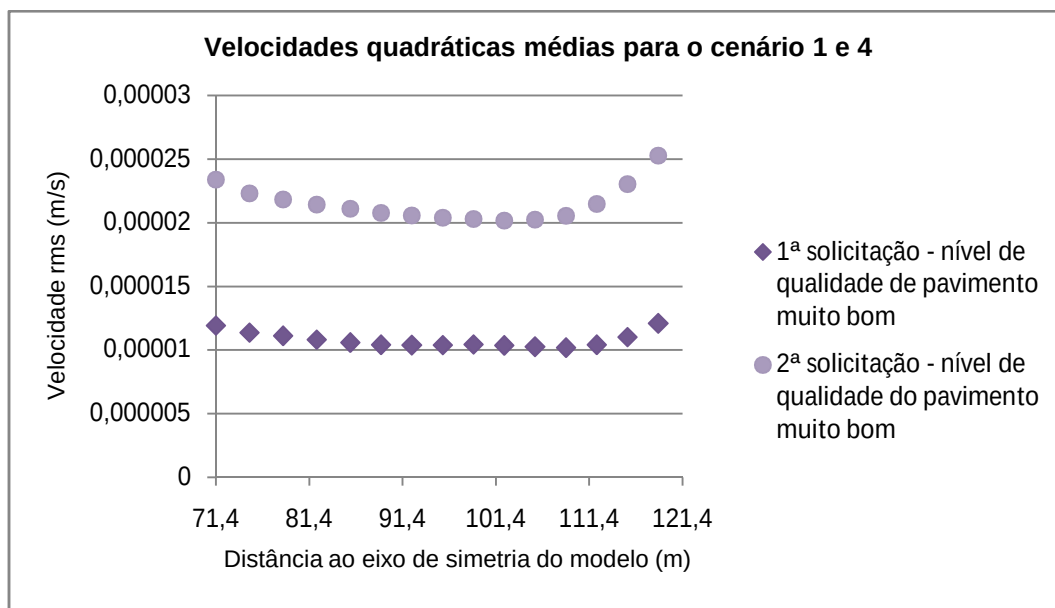


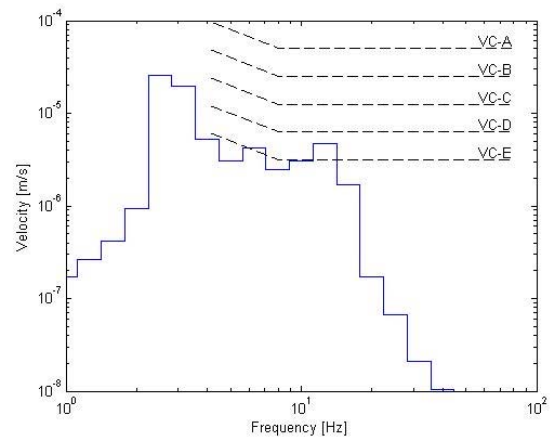
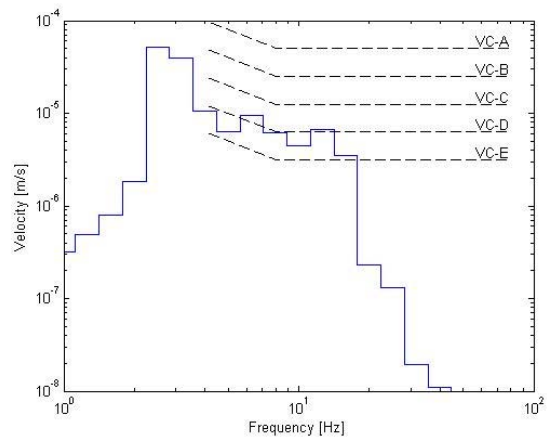
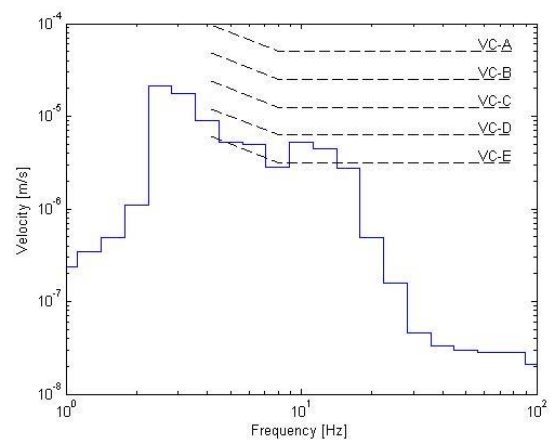
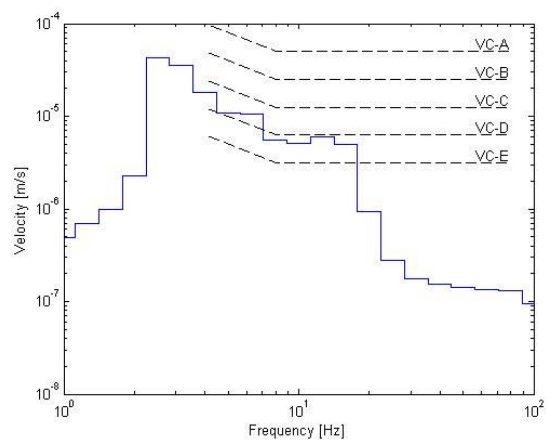


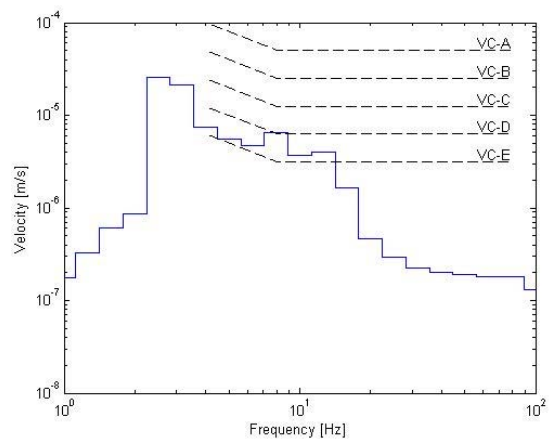
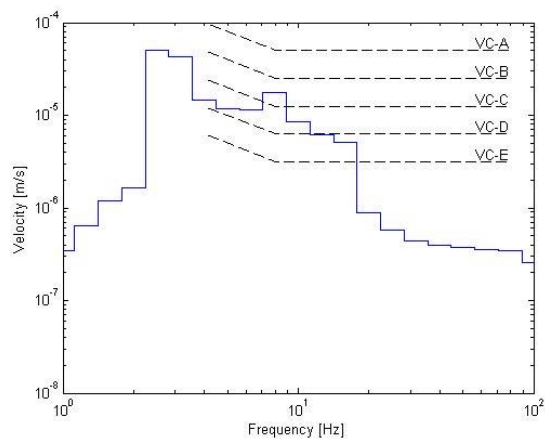
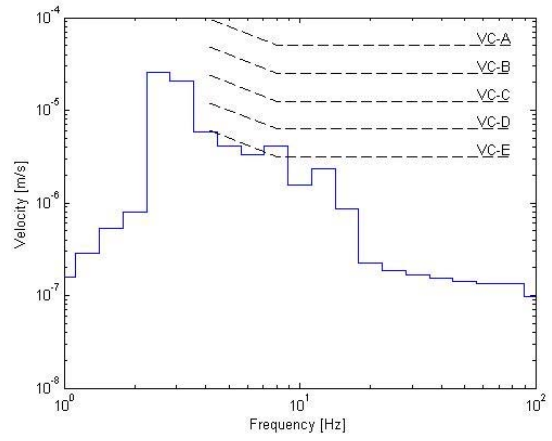
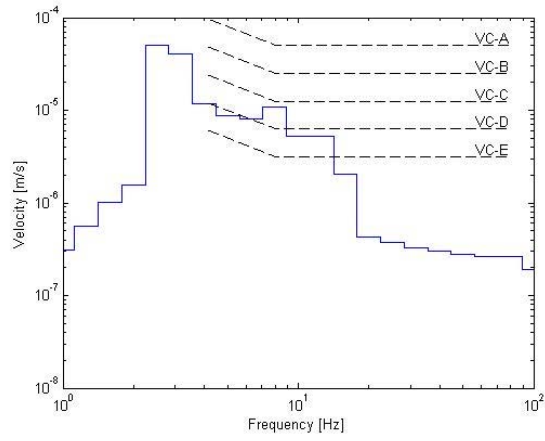
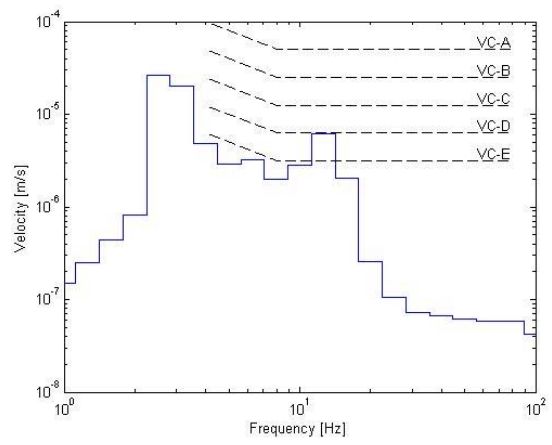
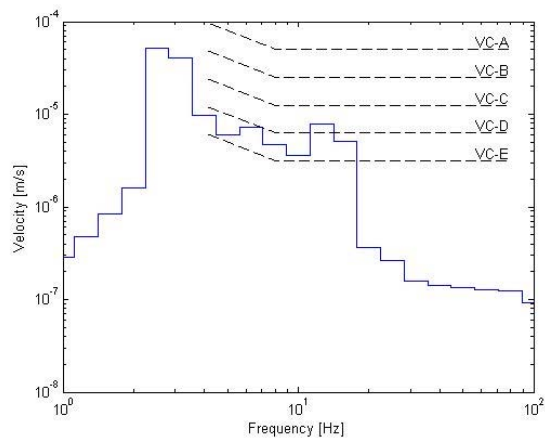


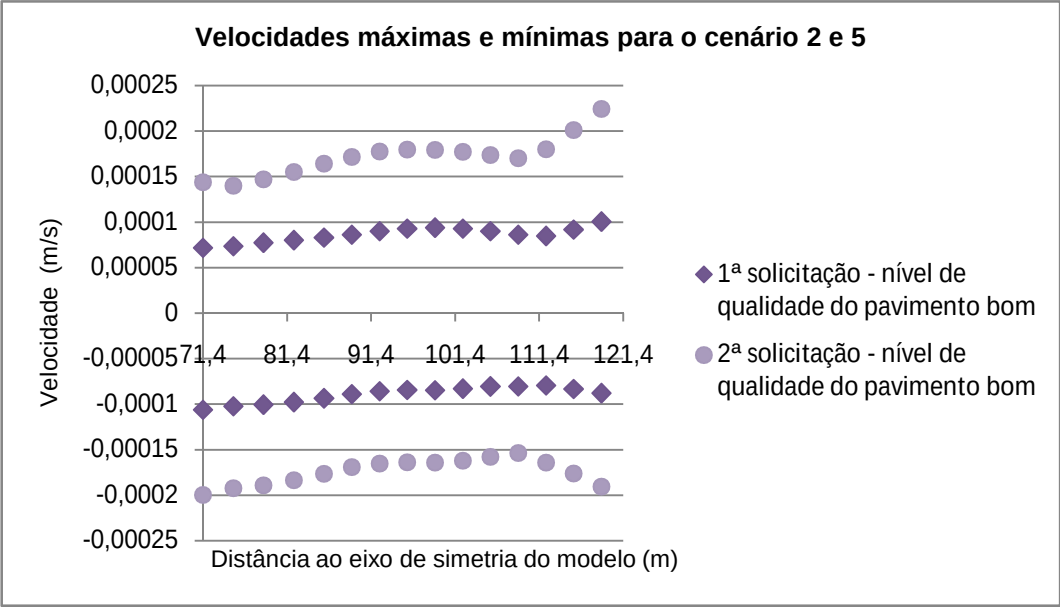


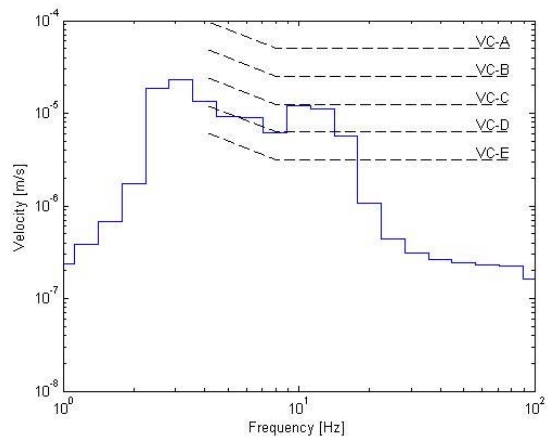
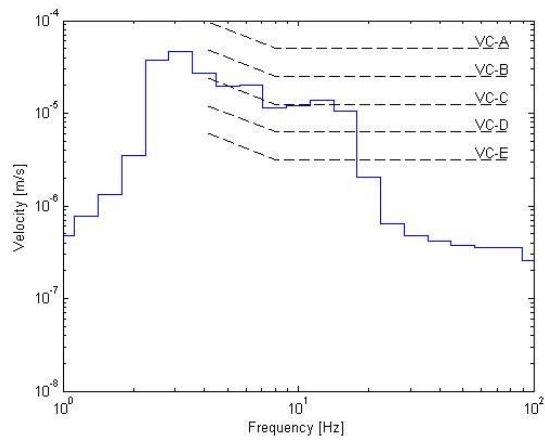
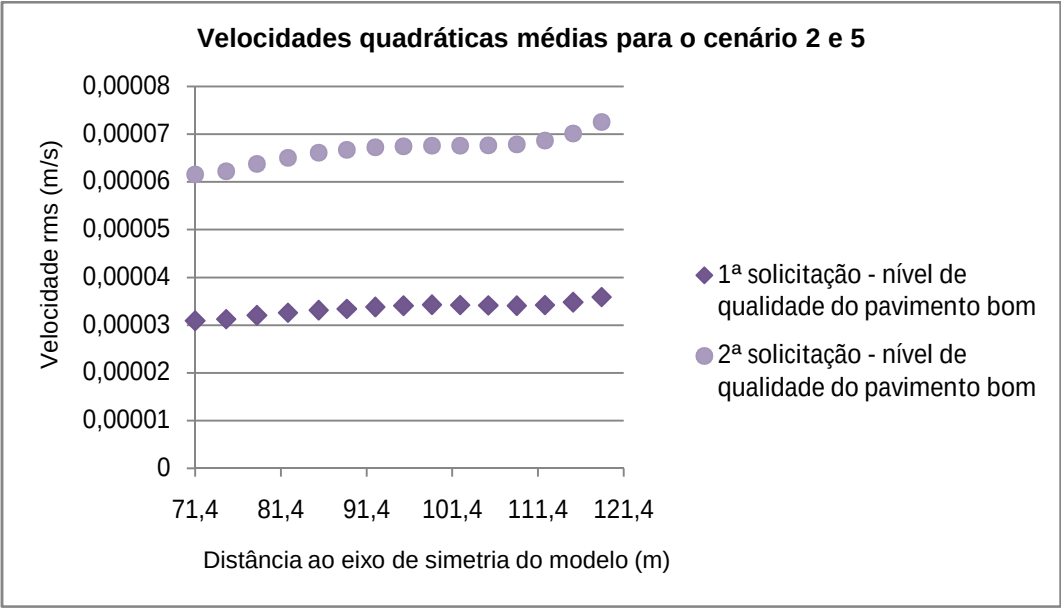


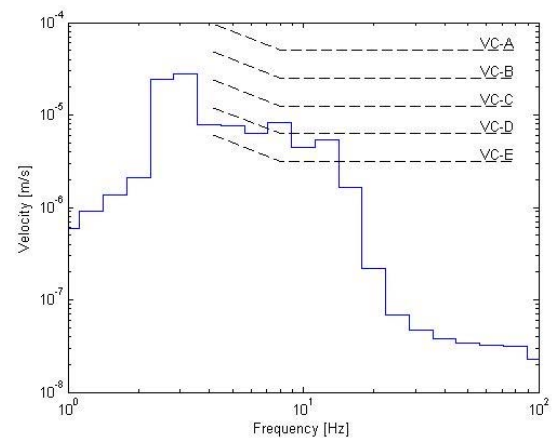
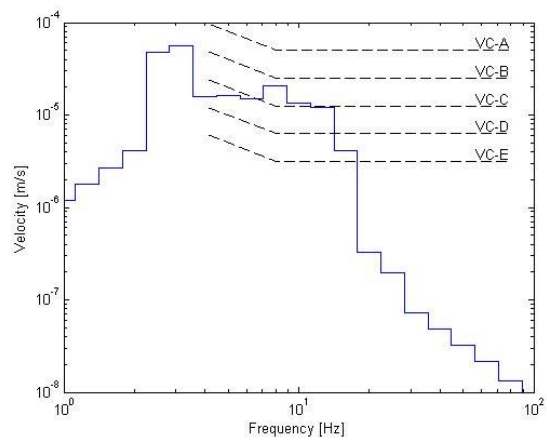
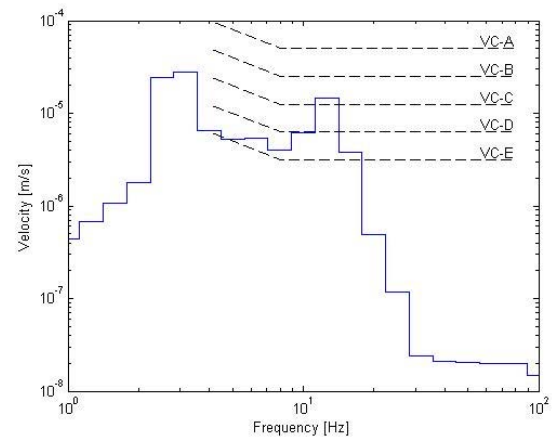
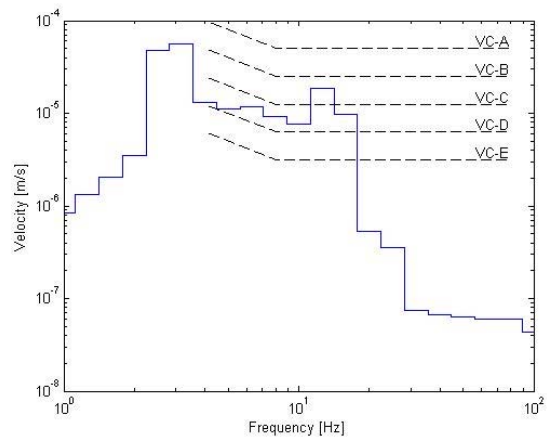
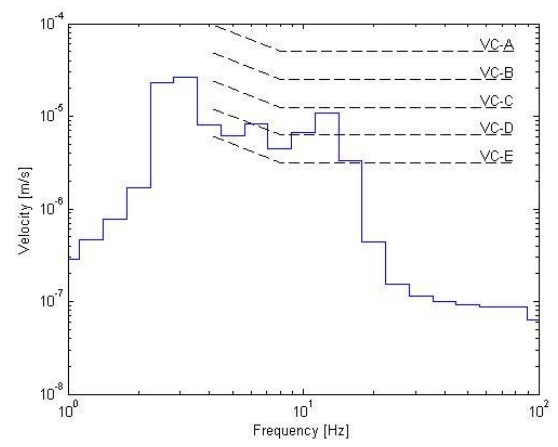
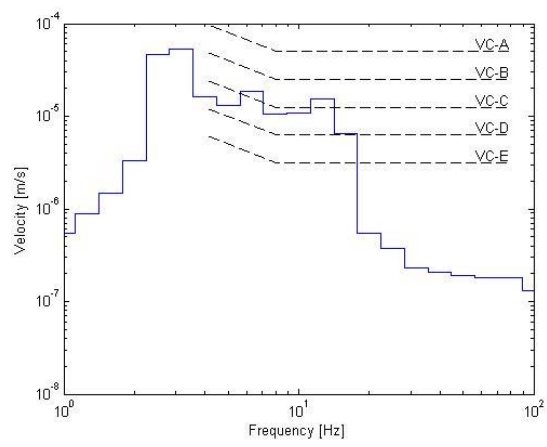


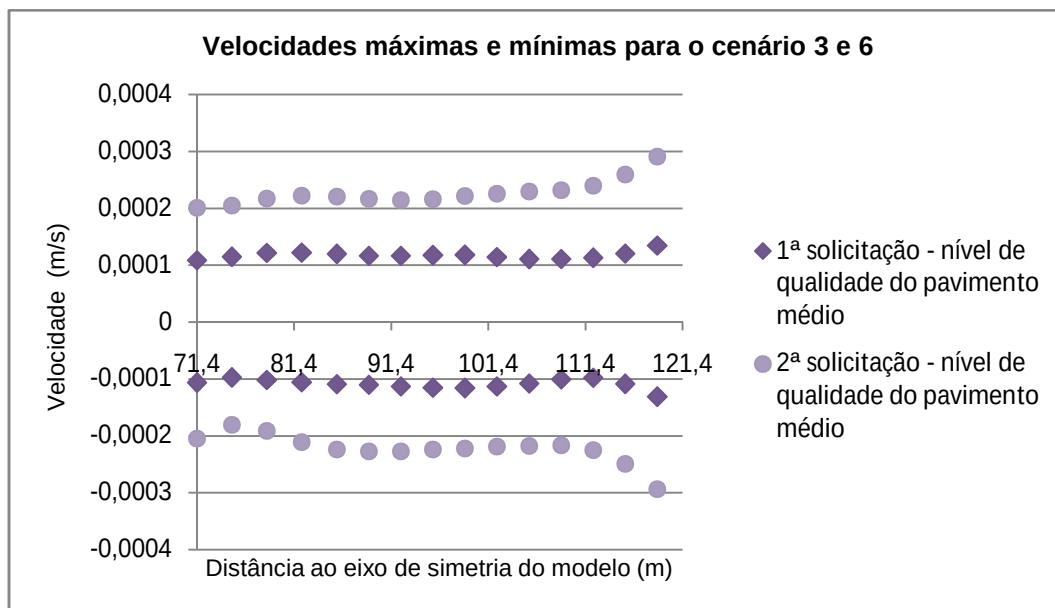
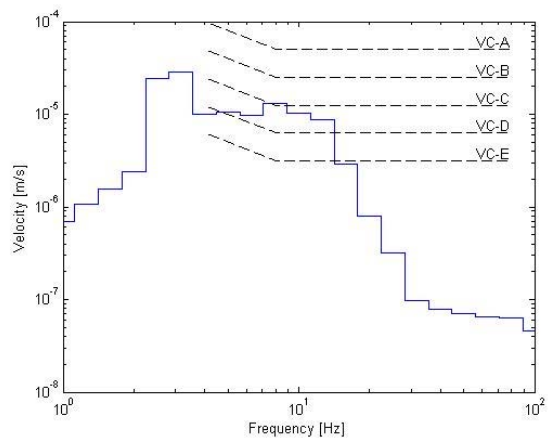
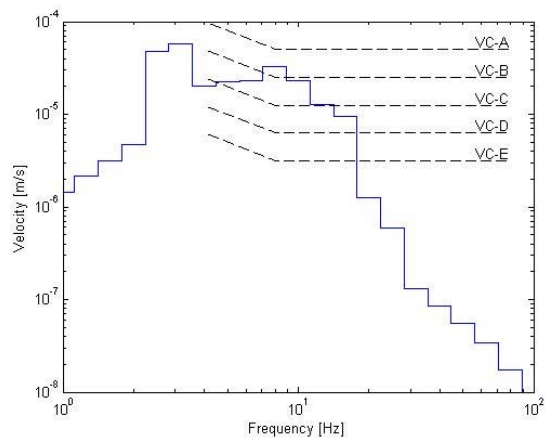


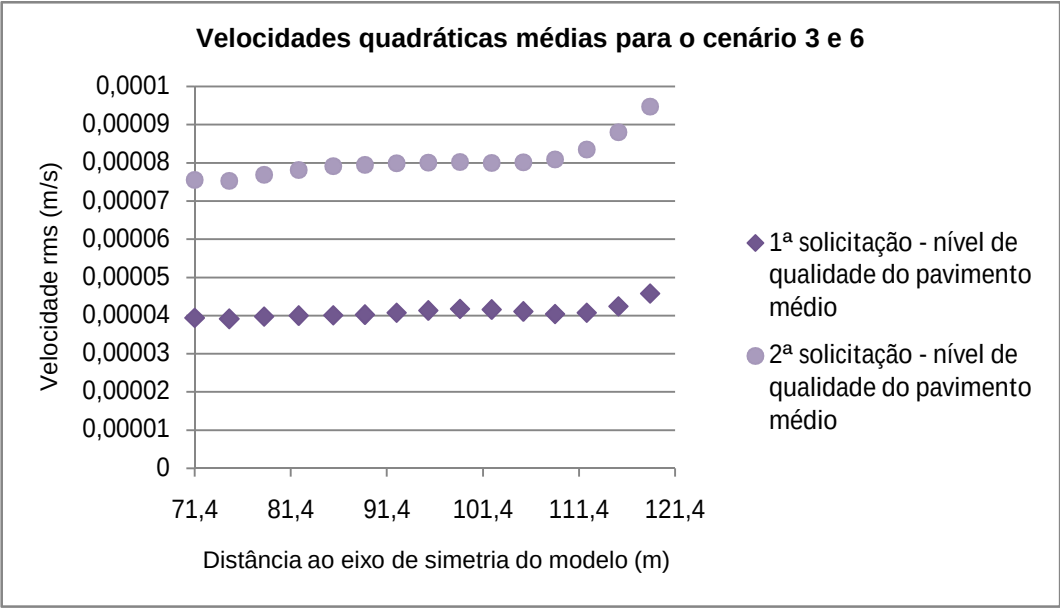


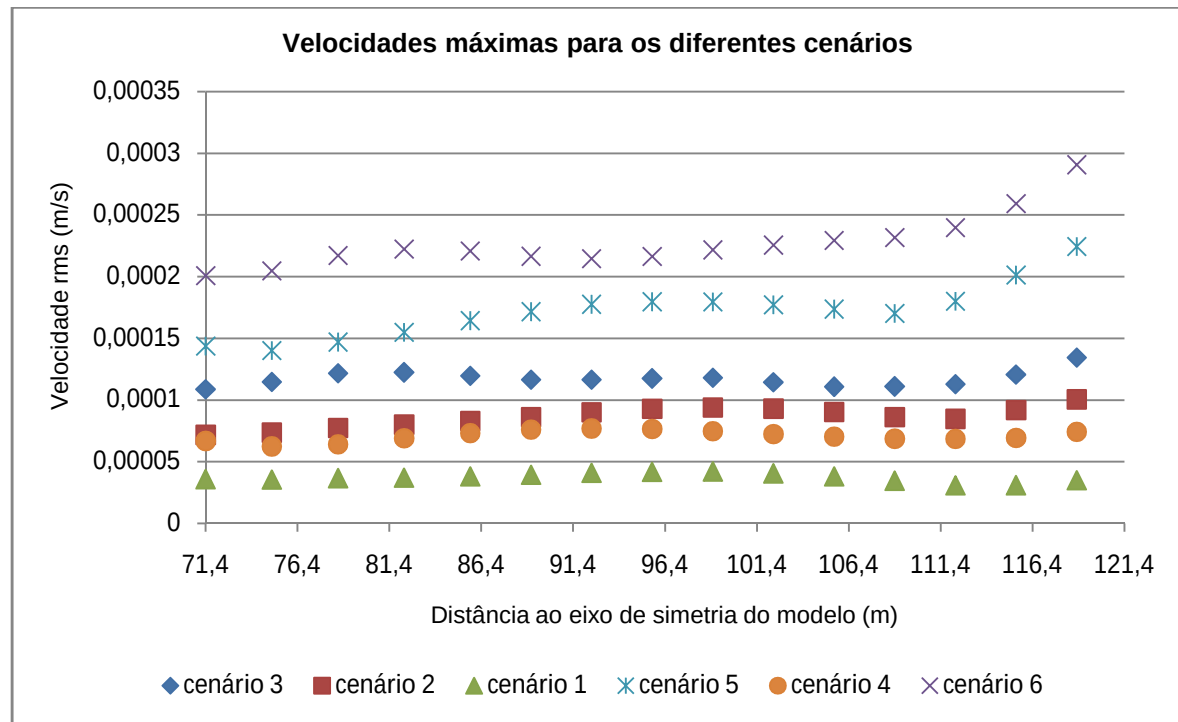
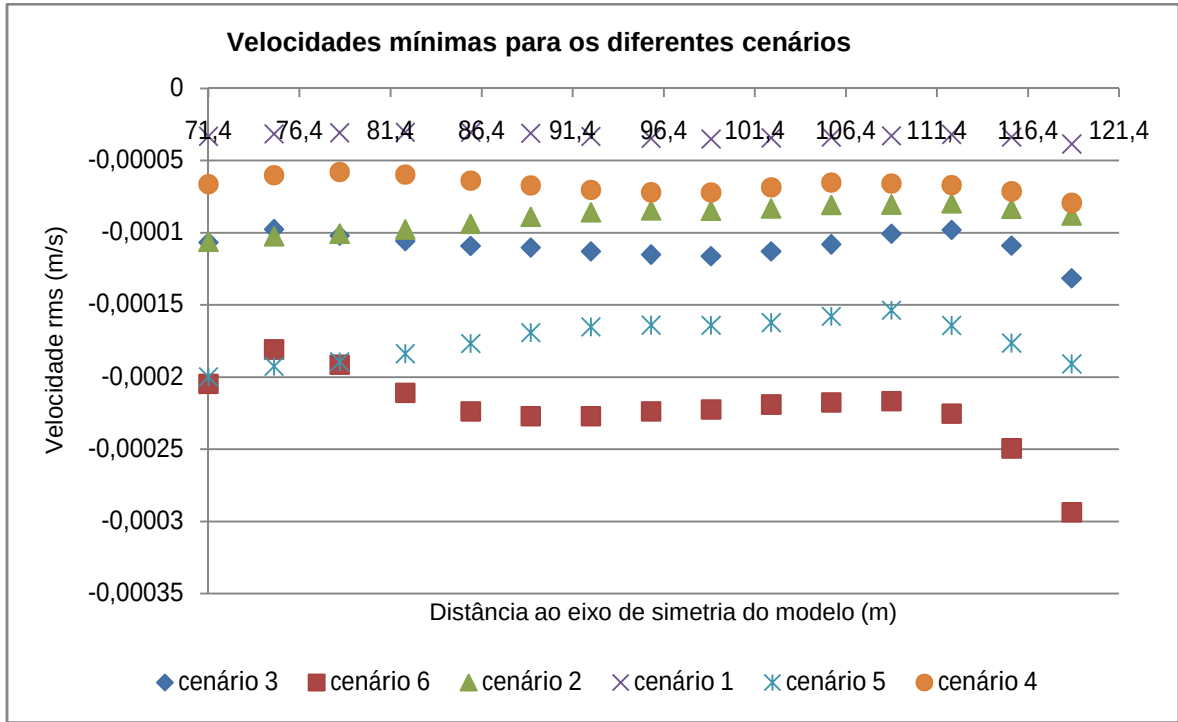


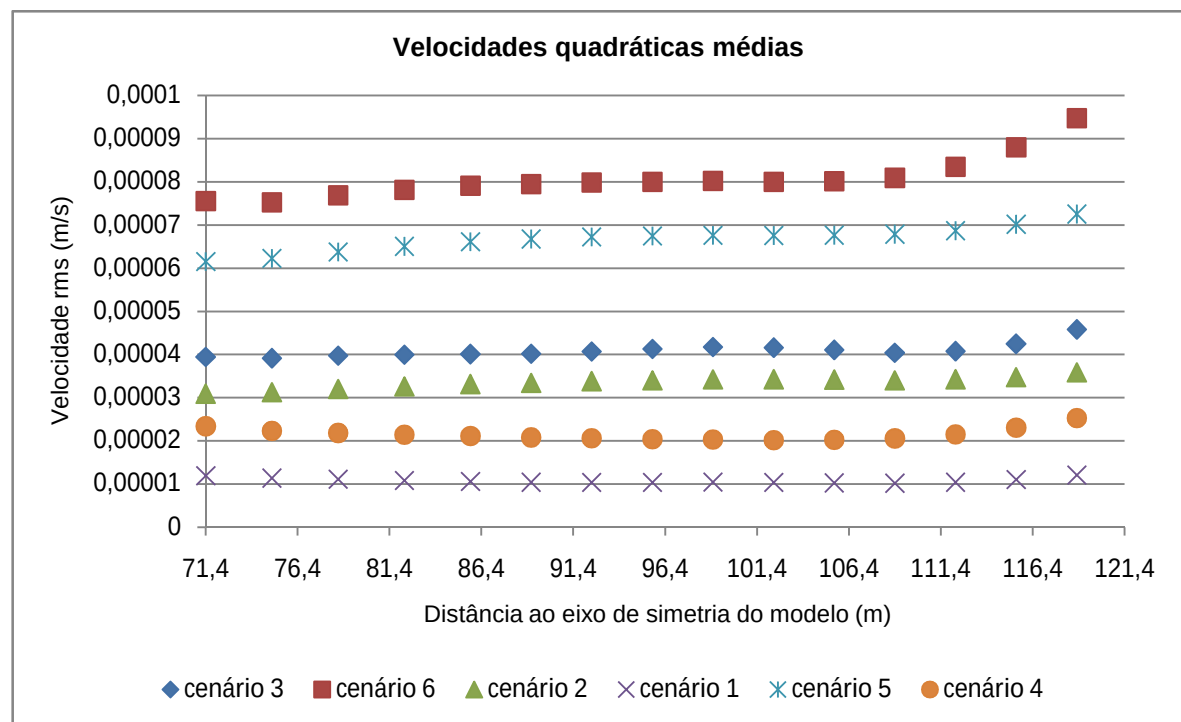












avaliados para o cenário 1 e 2. Segundo esta solicitação, a componente horizontal da velocidade quadrática média apenas não cumpre o critério genérico de vibração para o último tramo do pórtico para o qual se pretende um laboratório de nanolitografia. Relativamente ao critério mais restritivo, averiguou-se que nenhum dos laboratórios se encontra apto para o desenvolvimento das actividades previstas visto que, para frequências da ordem dos 2Hz, as VC-curves são excedidas pelas velocidades quadráticas médias registadas.

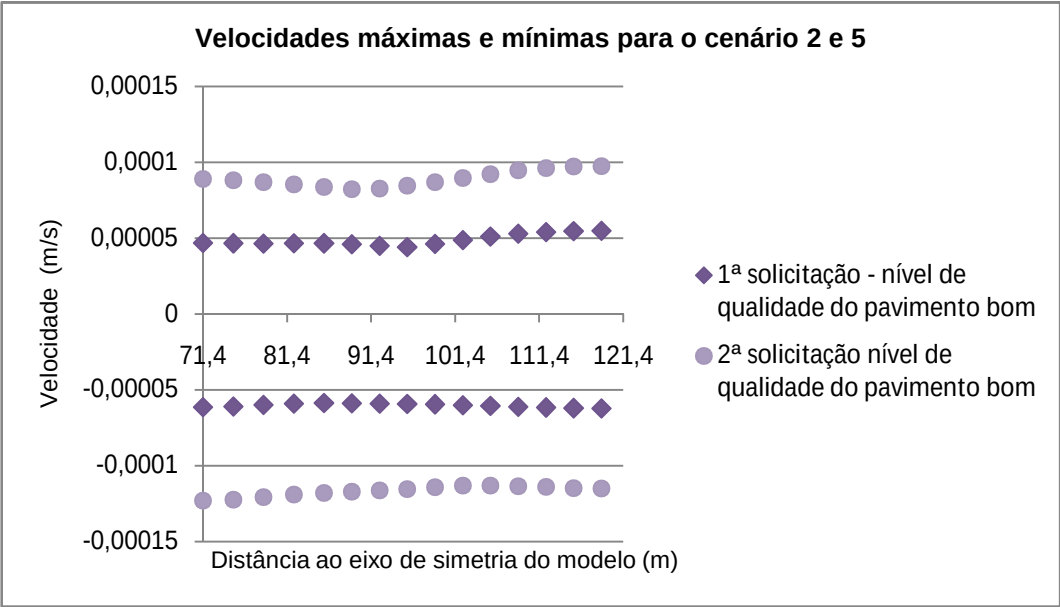
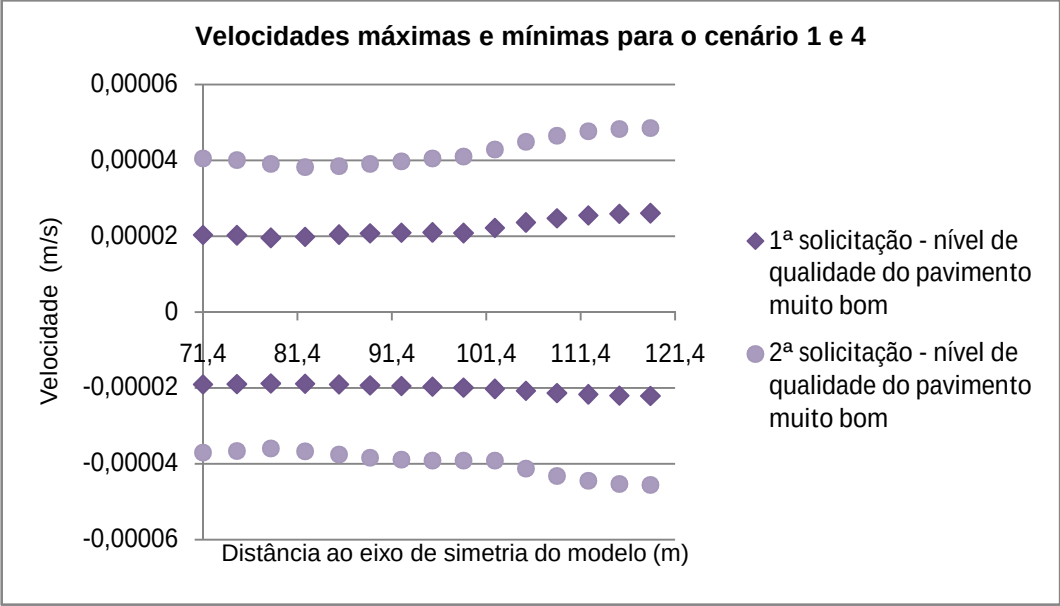
Cenário 4: Para o caso simulado pela circulação de 6 camiões articulados, observou-se uma redução dos valores registados para a velocidade quadrática média até ao nó localizado a 85,8m, crescendo desde então para algumas frequências e diminuindo para outras até às proximidades dos 95,7m. A partir daí observou-se um reduzido crescimento para quase todas as frequências. Para estas condições de solicitação, denotou-se mais uma vez que o último tramo do pórtico não cumpre os limites requeridos para o desenvolvimento das actividades laboratoriais esperadas. Apercebeu-se igualmente que juntamente ao último tramo do pórtico, o penúltimo tramo do pórtico apresentava velocidades de vibração que quando confrontadas com os critérios mais rígidos ultrapassavam os $3,12\mu\text{m/s}$ e os $6,25\mu\text{m/s}$ respectivamente.

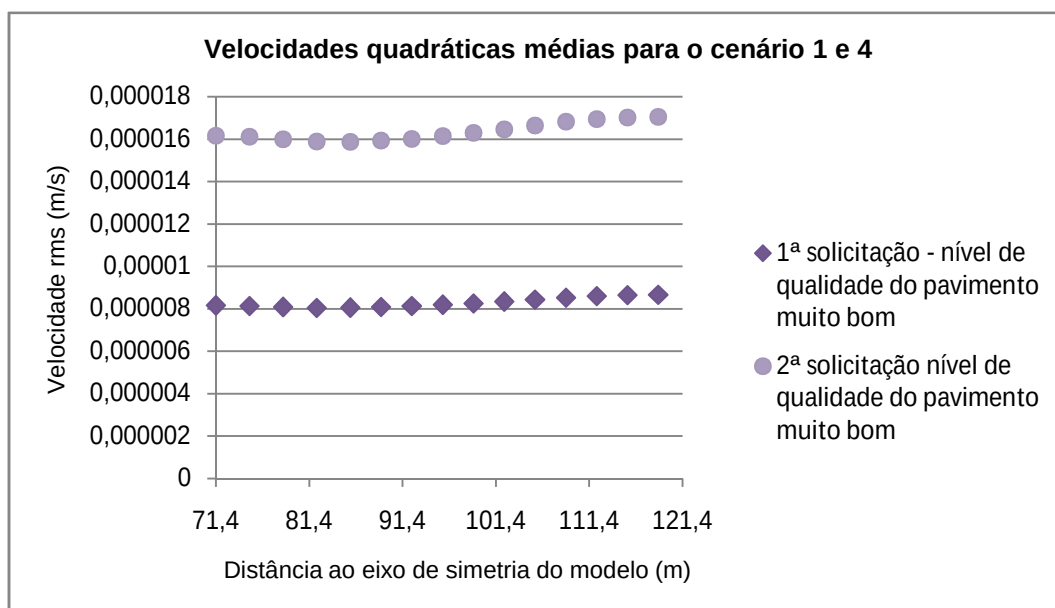
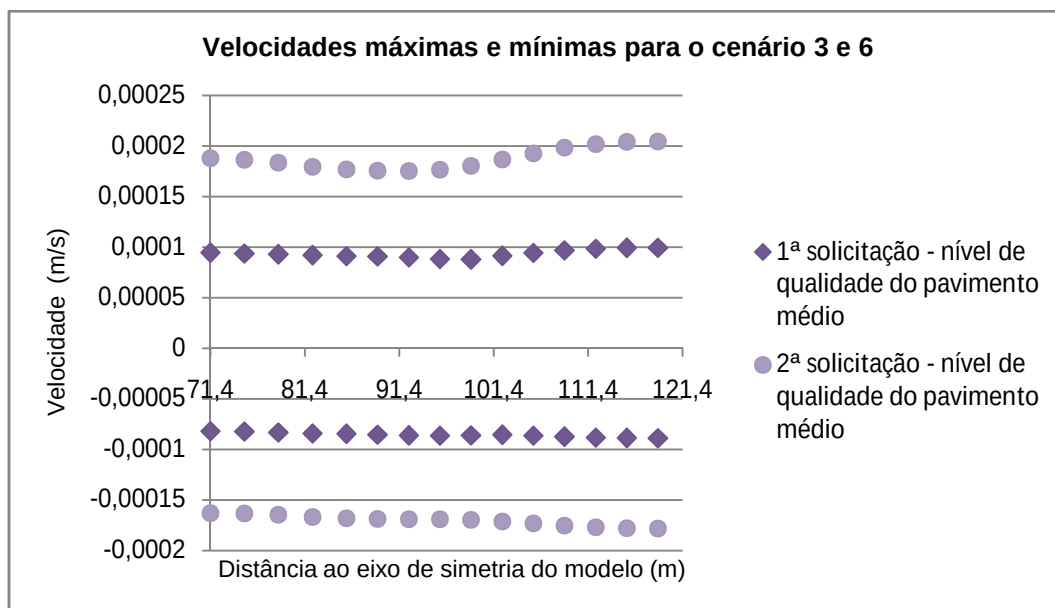
Cenário 5: Verificou-se um mesmo comportamento das velocidades ao longo da sua propagação pelo piso 0 da estrutura porticada, obviamente que agravadas pelas condições de solicitação. Quanto ao cumprimento dos critérios genéricos de vibração esperados de acordo com a tipologia de actividade laboratorial, observou-se que apenas os dois últimos tramos do pórtico, excederam os limites preconizados pelas VC-curves. Aplicando o critério mais restritivo verificou-se que nenhum dos tramos do pórtico se encontra apto para desenvolver as actividades laboratoriais.

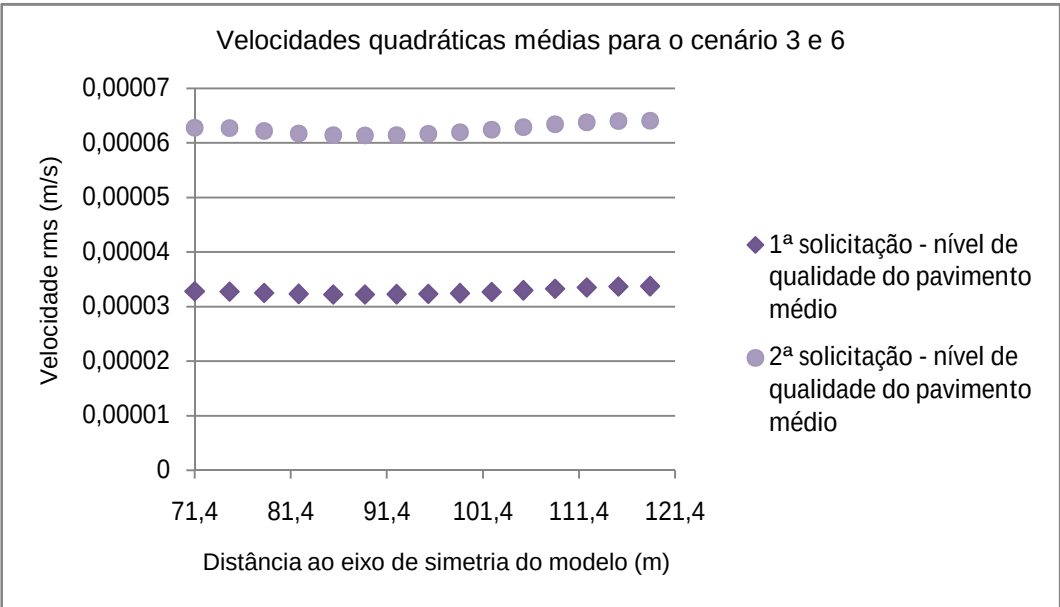
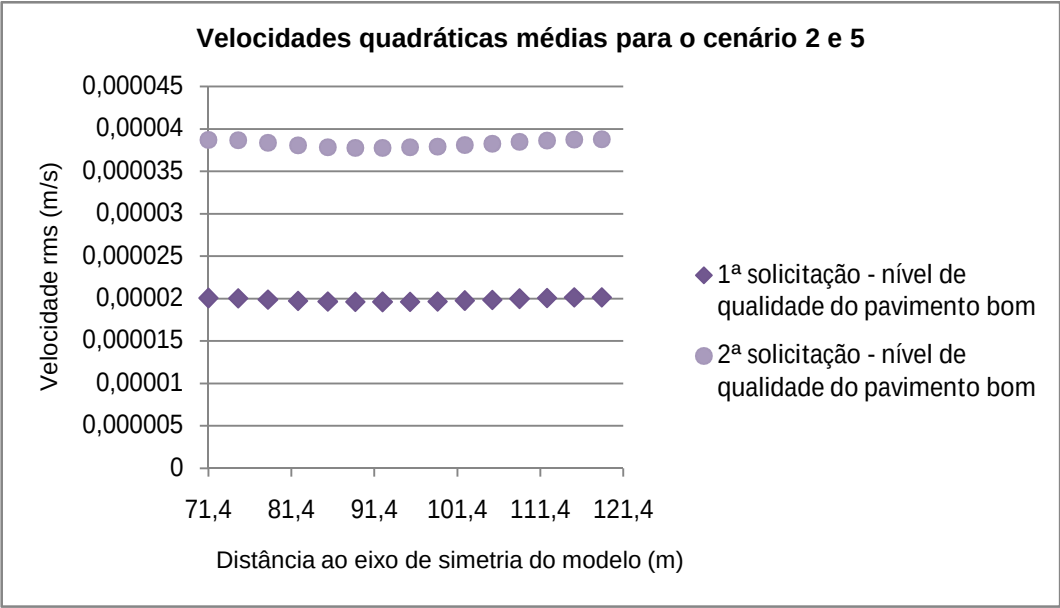
Cenário 6: Verificou-se um decréscimo da velocidade quadrática média até ao nó localizado a 85,8m, sendo que a partir deste observou-se uma inversão do comportamento para a generalidade das frequências. Para o cenário estabelecido como o mais desvantajoso, visto importar solicitações de rara probabilidade de ocorrência, o critério apenas não foi cumprido para os dois últimos tramos do pórtico. Pela mesma razão averiguada em todos os outros cenários, o cumprimento do critério mais restritivo fica impedido devido aos elevados valores registados para as velocidades quadráticas médias associadas às vibrações de baixa frequência.

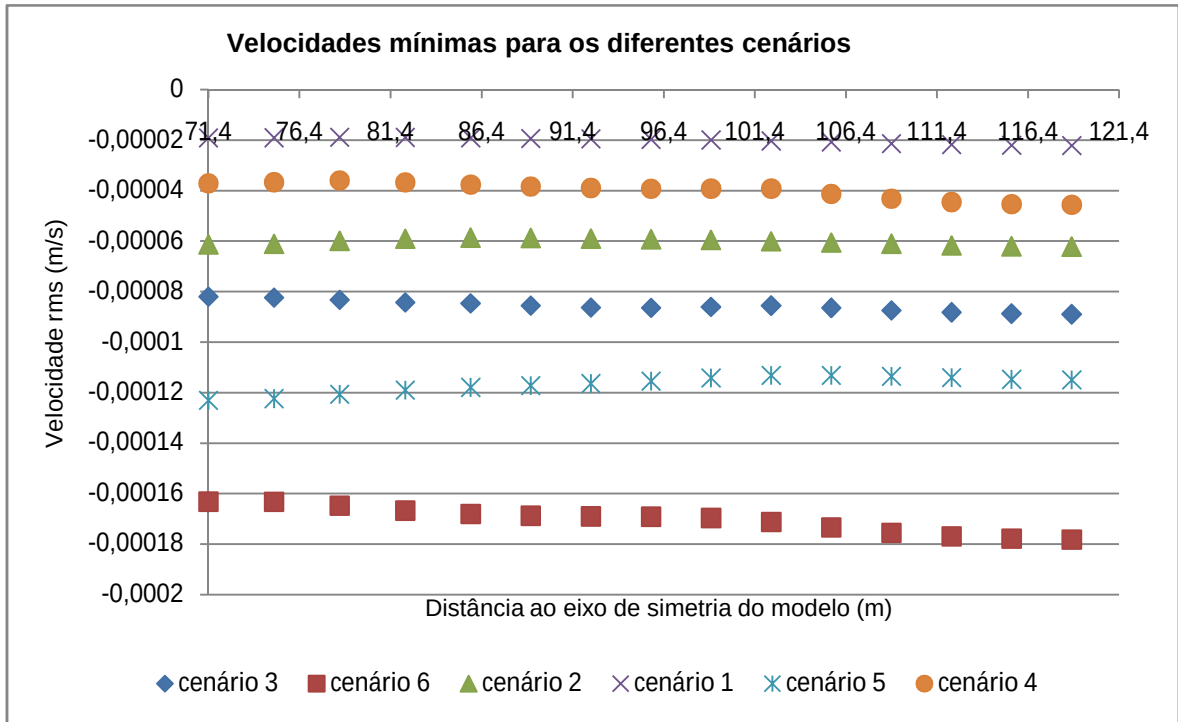
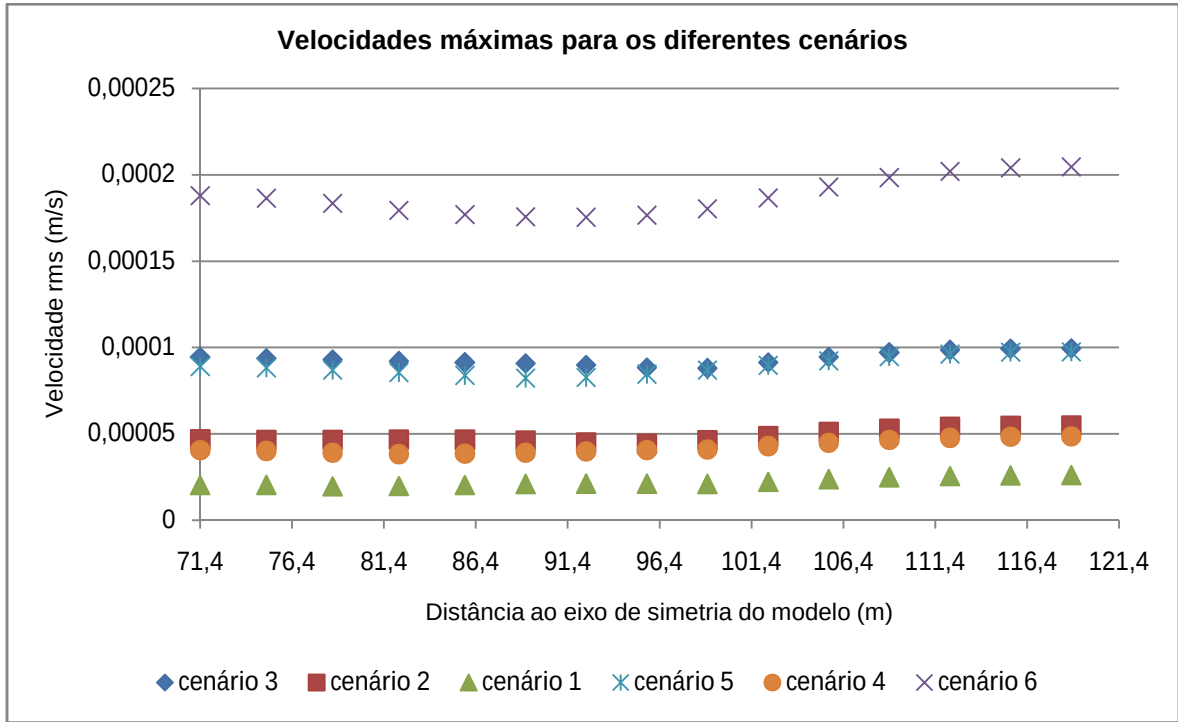
Um aspecto que se denotou sobrejacente à análise desta componente da velocidade, incidiu sobre uma maior constância dos valores referentes à velocidade quadrática média, averiguando-se ainda, e tal como se pôde confirmar igualmente para os gráficos referentes à componente horizontal registadas para o piso 1, uma maior discrepância referentes aos modos fundamentais de vibração do veículo. De facto, inferiu-se que tal fenómeno poderá estar associado a uma amplificação dinâmica, já que, pelo que se pôde confirmar pela análise dos três primeiros modos de vibração, a estrutura porticada sofre apenas movimentos horizontais dos seus pisos.

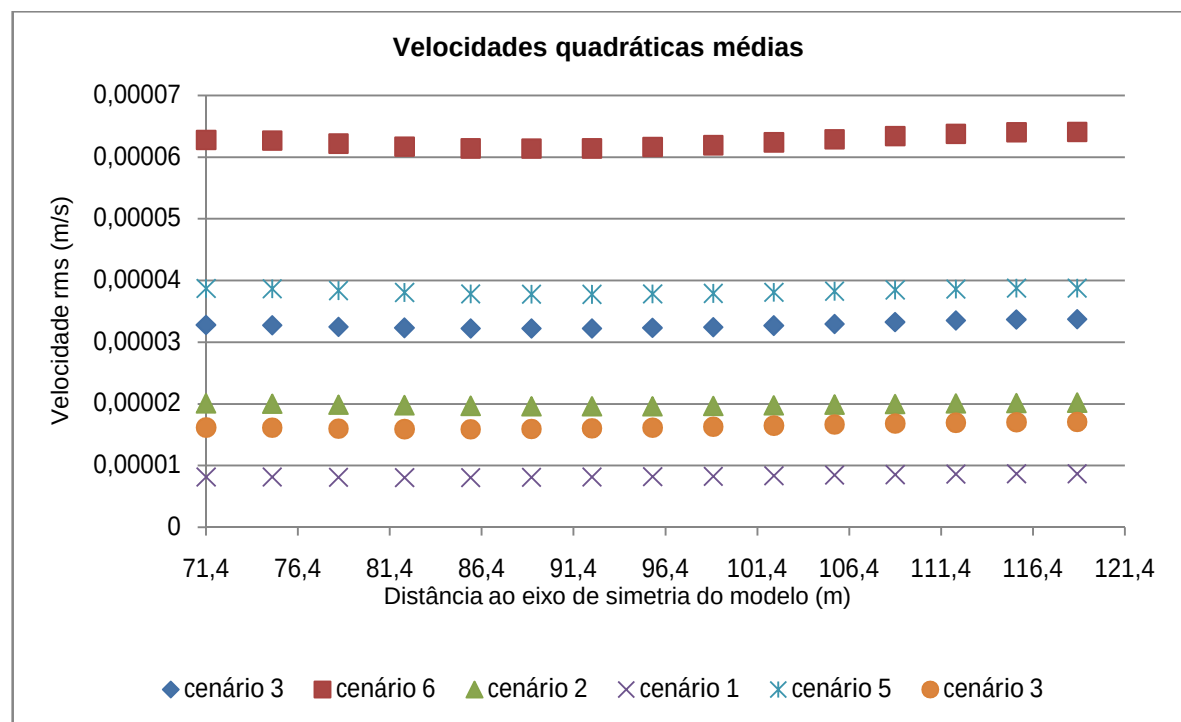
Os gráficos que se seguem, referentes às velocidades quadráticas médias, às velocidades máximas e velocidades mínimas, permitiram a obtenção de algumas conclusões. Tal como os gráficos analisados para a componente vertical da velocidade, estes permitiram observar o comportamento das velocidades máximas, mínimas e médias quadráticas ao longo da estrutura porticada, pelo que se observou que nas proximidades dos 91,4m e dos 111,4m devem existir alguns condicionalismos associados ao sistema elaborado que interferem no modo de propagação das ondas. Apesar de estas zonas não coincidirem exactamente nas mesmas observadas para os gráficos das velocidades quadrática médias em função de bandas de 1/3 de oitava da frequência, remetidos para anexo (ANEXO A3), inferiu-se que tal acontecimento esteja correlacionado com a geometria da











1

DISPLACEMENT

STEP=1

SUB =2

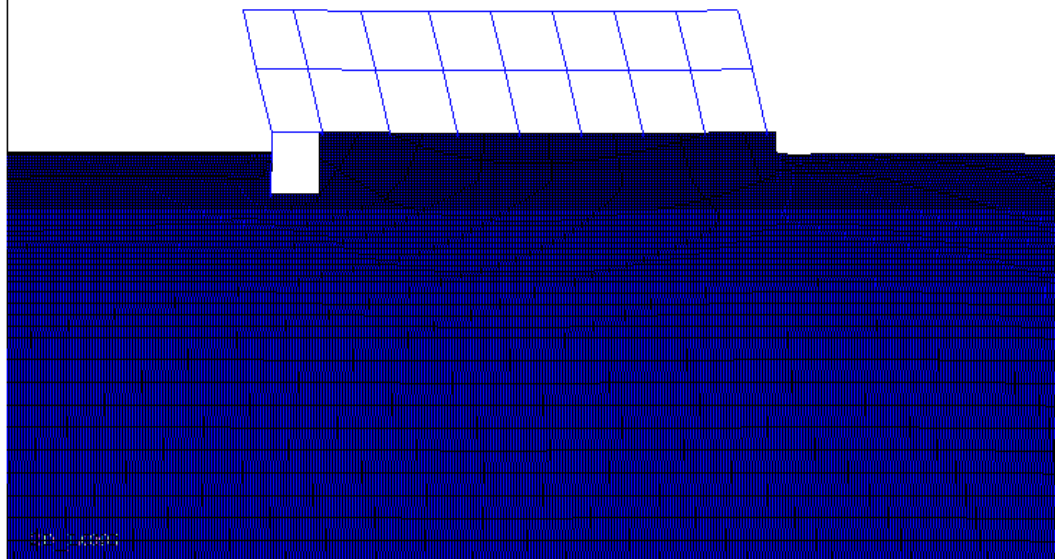
FREQ=1..7

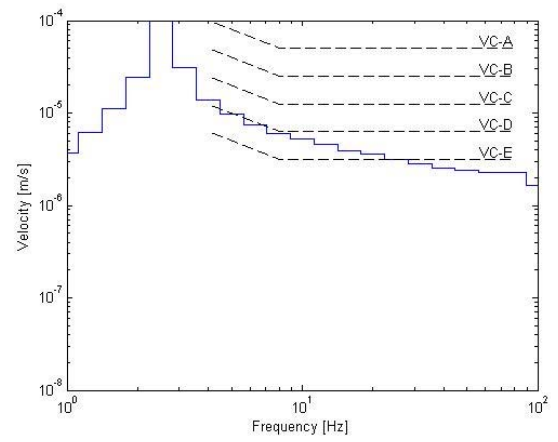
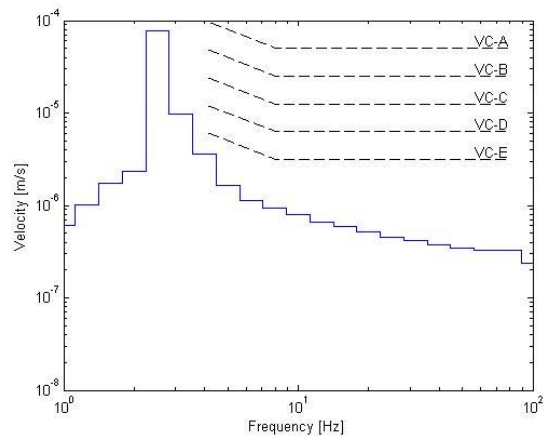
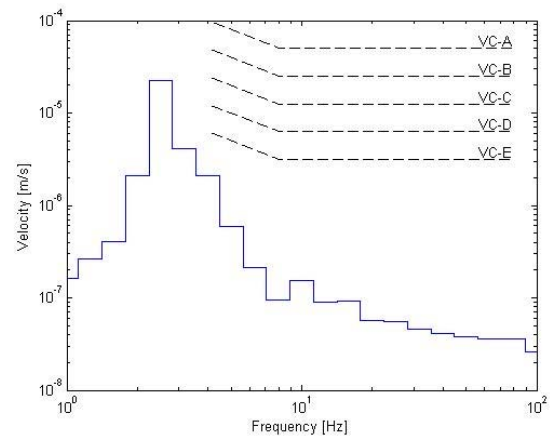
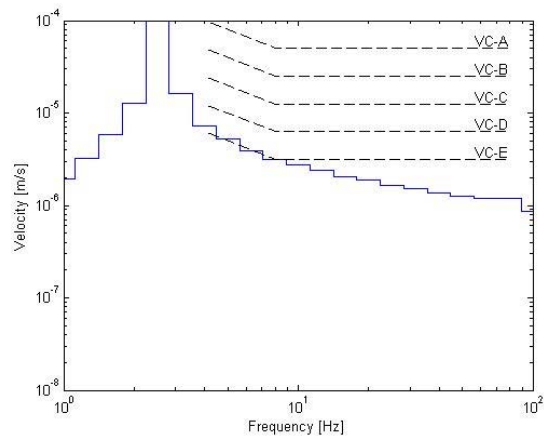
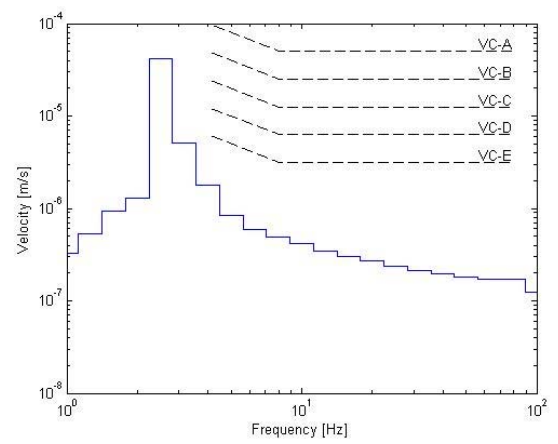
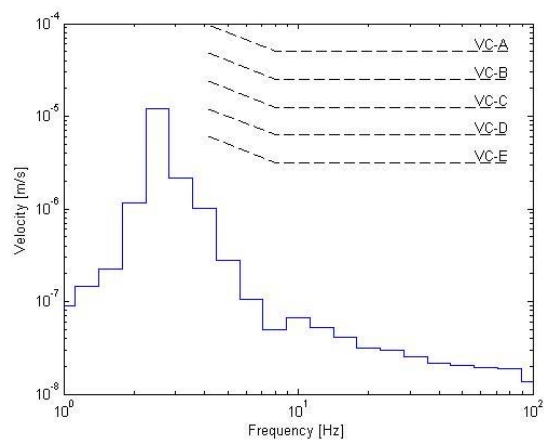
DMX =.001206

ANSYS

JUN 26 2009

04:31:41





Solo (MPa)	Velocidade (km/h)	3D				2D			
		nó 18		nó 20		nó 18		nó 20	
		(mm/s)	%	(mm/s)	%	(mm/s)	%	(mm/s)	%
100	350	0.36	77.50	0.39	80.5	0.55	50.28	1.24	63.81
200	350	0.1	81.13	0.17	81.11	0.38	33.84	0.95	62.77

7

CONCLUSÕES

7.1. CONCLUSÕES GERAIS

O objectivo principal, preconizado para a presente dissertação, teve por base averiguar se as vibrações induzidas pelo tráfego rodoviário nas contiguidades de um edifício “sensível”, cumpriam os critérios preconizados para o óptimo desenvolvimento das actividades intrínsecas a cada um dos laboratórios existente no interior do edifício. Assim após realizado um feedback de estudos realizados por alguns autores para a clarificação de alguns conceitos fundamentais à compreensão do fenómeno em si, seguiu-se uma investigação das metodologias de análise depreendendo-se qual a que melhor se adequava ao problema afigurado de acordo com os procedimentos utilizados pelo programa ANSYS. Por seu turno a elaboração do modelo, tendo por base o método dos elementos finitos, envolveu certos aspectos fulcrais para a sua modelação, fundamentais ao seu correcto funcionamento quando solicitado por uma acção dinâmica. As condições fronteira e o tamanho dos elementos a implementar na malha são factores bastante determinantes, por motivos previamente referidos, para a obtenção de resultados precisos.

Com este estudo, e após a confrontação dos resultados obtidos com os critérios genéricos de vibração, devido às inconstâncias na forma de propagação das ondas, apontou-se como motivo a possibilidade da existência de factores condicionantes na forma de propagação das ondas ao longo do solo.

Apesar dos resultados obtidos apenas cumprirem os critérios genéricos de vibração para o cenário mais favorável, a sua justificação tem por base, entre outras inúmeras razões, o modelo adoptado e elaborado para o estudo das vibrações induzidas pelo tráfego rodoviário. De facto o modelo 2D, apesar de se configurar mais simples aliando ainda a vantagem do tempo de processamento de cálculo ser incomparavelmente mais reduzido que o necessário para a análise de um modelo 3D, este pode determinar a obtenção de resultados um pouco distintos dos que ocorreriam num modelo 3D.

Relativamente aos diferentes cenários simulados e avaliados, tal como se pôde inferir pelas suas análises, o nível de qualidade de pavimento é um dos factores com mais influência na propagação das vibrações, já que com o aumento das irregularidades, ocorre uma amplificação da componente dinâmica da acção induzida no sistema, confirmou-se mesmo que é preferível uma situação em que circulam 6 camiões articulados num pavimento com um nível de qualidade muito bom que o cenário empreendido pela circulação de 3 camiões num pavimento com qualidade boa ou média. Por sua vez as discrepâncias verificadas entre a circulação de 3 e 6 veículos, para um mesmo nível de qualidade, apontam para o dobro das velocidades médias entre um e outro cenário, não implicado no entanto a mesma relação entre as velocidades máximas e mínimas, já que se constatou que para determinadas frequências de vibração as diferenças eram bastante consideráveis enquanto para outras estas eram mínimas.

Relativamente aos critérios genéricos de vibração preconizados para cada laboratório do piso 0 do projecto, apurou-se que estes apenas eram cumpridos para o cenário 1 na condicionante de não existirem equipamentos com isolamento vibratório pneumático interno, já que devido à sua sensibilidade para frequências entre 1 e 4 Hz, os critérios apresentam uma configuração mais restritiva. Por sua vez os cenários 2 e 4, referentes, respectivamente, à circulação de 3 camiões num pavimento com um nível de qualidade boa e à circulação de 6 camiões num pavimento com um nível de qualidade muito bom, apenas ultrapassavam o limite de velocidade quadrática média imposta para o desenvolvimento da nanolitografia no último laboratório. Relativamente ao cenário 6 que simulou a pior solicitação, sobre estas condições nenhum dos laboratórios se fomenta apto para o desenvolvimento das actividades para as quais foram projectados. Já o cenário 5, que simulou a circulação de 6 camiões num pavimento com um nível de qualidade bom reflecte igualmente melhores resultados que os observados para o cenário 3, correspondente à circulação de 3 camiões, num pavimento com um nível de qualidade média. Esta última informação não se encontra muito sobrejacente nos gráficos correspondentes às velocidades máximas e mínimas, segundo os quais o cenário 3 parece condicionar a obtenção de melhores resultados, no entanto não são estas as velocidades que condicionam o desenvolvimento da actividade já que podem estar associados a níveis de vibração muito reduzidos, quadro 7.1.

Relativamente aos laboratórios estipulados para o 1º piso, verificou-se que a velocidade quadrática média apenas excedia a curva VC-A, quando o sistema era excitado pela circulação dos camiões em pavimentos com um nível de qualidade médio. Este bom comportamento dos laboratórios deve-se igualmente ao bom comportamento da estrutura porticada, determinada por uma rigidez considerável dos seus elementos resistentes, quadro 7.1.

Por outro lado, aplicando o critério estabelecido por *Gordon & Associates*, de acordo com a nova interpretação do critério genérico de vibração (*"IEST criteria"*), para o caso de laboratórios que conformem actividades que envolvam actividades com equipamentos com isolamento pneumático interno, então nenhum destes cenários seria propício sendo obviamente necessária a introdução de uma medida de mitigação, quadro 7.1. O que de facto se observou para muitos dos cenários simulados é que estes critérios são ultrapassados apenas para as velocidades quadráticas médias associadas às baixas frequências, que são os determinados pelos movimentos das caixas dos veículos sobre as suspensões e pneus.

Sucintamente inferiu-se, com a realização da presente dissertação, que o modo de propagação das ondas através de um modelo pode-se ser altamente influenciado por determinados factores condicionantes, nomeadamente os que se inter-relacionam directamente com o amortecimento geométrico e o amortecimento material. Concluiu-se igualmente que o nível de qualidade do pavimento é um factor preponderante na geração da acção dinâmica já que um pavimento mais deteriorado induz um aumento da componente dinâmica desta solicitação. Inferiu-se ainda que ao redobrar a acção dinâmica, as velocidades que se fazem sentir ao nível do ensoleiramento são igualmente duplicadas.

Quadro 7.1 – Quadro resumo do cumprimento dos critérios para os diferentes cenários

Cenários		Piso 0			Piso 1		
		Velocidade (comp. vertical)	Velocidade (comp. horizontal)	Generalidade	Velocidade (comp. vertical)	Velocidade (comp. horizontal)	Generalidade
1	Critério genérico de vibração	Cumpre	Cumpre	Cumpre	Cumpre	Cumpre	Cumpre
	Nova interpretação do <i>IEST criteria</i>	Não cumpre para os dois últimos tramos do pórtico	Não cumpre para o último tramo do pórtico	Não cumpre para os dois últimos tramos do pórtico	Cumpre	Cumpre	Cumpre
2	Critério genérico de vibração	Não cumpre para o último tramo do pórtico	Não cumpre para o último tramo do pórtico	Não cumpre para o último tramo do pórtico	Cumpre	Cumpre	Cumpre
	Nova interpretação do <i>IEST criteria</i>	Não cumpre para nenhum dos tramos do pórtico	Não cumpre para nenhum dos tramos do pórtico	Não cumpre para nenhum dos tramos do pórtico	Cumpre	Cumpre	Cumpre
3	Critério genérico de vibração	Não cumpre para a maioria dos tramos do pórtico	Não cumpre para os dois últimos tramos do pórtico	Não cumpre para a maioria dos tramos do pórtico	Não cumpre para o 1º tramo do pórtico	Cumpre	Não cumpre para o 1º tramo do pórtico
	Nova interpretação do <i>IEST criteria</i>	Não cumpre para nenhum dos tramos do pórtico	Não cumpre para nenhum dos tramos do pórtico	Não cumpre para nenhum dos tramos do pórtico	Não cumpre para o 1º tramo do pórtico	Cumpre	Não cumpre para o 1º tramo do pórtico
4	Critério genérico de vibração	Não cumpre para o último tramo do pórtico	Não cumpre para o último tramo do pórtico	Não cumpre para o último tramo do pórtico	Cumpre	Cumpre	Cumpre
	Nova interpretação do <i>IEST criteria</i>	Não cumpre para nenhum dos tramos do pórtico	Não cumpre para os dois últimos tramos do pórtico	Não cumpre para nenhum dos tramos do pórtico	Cumpre	Cumpre	Cumpre
5	Critério genérico de vibração	Não cumpre para os dois últimos tramos do pórtico	Não cumpre para os dois últimos tramos do pórtico	Não cumpre para os dois últimos tramos do pórtico	Cumpre	Cumpre	Cumpre
	Nova interpretação do <i>IEST criteria</i>	Não cumpre para nenhum dos tramos do pórtico	Não cumpre para nenhum dos tramos do pórtico	Não cumpre para nenhum dos tramos do pórtico	Cumpre	Cumpre	Cumpre
6	Critério genérico de vibração	Não cumpre para nenhum dos laboratórios	Não cumpre para os dois últimos tramos do pórtico	Não cumpre para nenhum dos laboratórios	Não cumpre para o 1º tramo do pórtico	Cumpre	Não cumpre para o 1º tramo do pórtico
	Nova interpretação do <i>IEST criteria</i>	Não cumpre para nenhum dos laboratórios	Não cumpre para nenhum dos laboratórios	Não cumpre para nenhum dos laboratórios	Não cumpre para o 1º tramo do pórtico	Cumpre	Não cumpre para o 1º tramo do pórtico

7.2. PERSPECTIVAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Tal como se pôde inferir com os resultados deste trabalho, inúmeras são as dúvidas que se suscitaram relativamente ao modo de propagação das ondas Rayleigh. Sugere-se portanto, para trabalhos futuros a determinação da influência da estratificação dos solos na propagação das ondas, enquanto variação dos parâmetros mecânicos e da geometria das distintas camadas. É igualmente de notável interesse avaliar a diferença entre a propagação das ondas em solos saturados ou não saturados, fazendo variar o posicionamento do nível freático. A determinação da eficácia da medida de mitigação adoptada seria um outro item a avaliar através da introdução de fundações correntes no edifício, conferindo posteriormente a influência por ela exercida.

A realização de um modelo 3D seria também um outro trabalho a desenvolver, na medida que permitiria debater os resultados obtidos, avaliando a interferência que o amortecimento material e geométrico exerce sobre velocidades de tão reduzida ordem de grandeza. Posteriormente uma validação experimental permitiria obter resultados que quando comparados com os obtidos através dos modelos 2D e 3D facultariam os erros inerentes aos próprios métodos de integração numérica, simplificações e propriedades materiais, etc. Estes permitiriam determinar alguns dos aspectos a corrigir na modelação de forma a permitir a obtenção de uma convergência dos resultados com o caso real.

REFERÊNCIAS

- [1] Calçada, Rui Artur. *Avaliação Experimental e Numérica de Efeitos Dinâmicos de Cargas de Tráfego em Pontes Rodoviárias*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, (2001).
- [2] Daniel, Hugo. *Haul Road defect identification and condition assessment using measured truck response*. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil, University of Pretoria, Pretoria, (2005).
- [3] Hall, Lars. *Simulations and Analyses of Train-induced Ground Vibrations – A comparative study of two- and three-dimensional calculations with actual measurements*. Dissertação de Doutoramento, Royal Institute of Technology, Stockholm, (2000).
- [4] Gonçalves, Sílvia Daniel. *Vibrações Induzidas em Edifícios Devidas ao Tráfego Ferroviário de Alta Velocidade*. Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil – Especialização em Estruturas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto (2008).
- [5] Bahrekazemi, Mehdi. *Train-Induced Ground Vibration and Its Prediction*. Dissertação de Doutoramento, Royal Institute of Technology, Stockholm, (2004).
- [6] http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/ctus/39_e.html. Março de 2009.
- [7] http://sed.sivv.it/documenti/63_2848_20080120200834.pdf. Março de 2009.
- [8] <http://www.civil.ist.utl.pt/ae2/IMEFAPPE.pdf>. Março. 2009.
- [9] <http://www.cganda.com/pdf/HA-TX-MG-Role-of-Buildings-and-Slabs.pdf>. Maio de 2009.
- [10] http://www2.civil.ua.pt/Downloads/Mestrado_Carlos%20Coelho.pdf. Abril de 2009.
- [11] Chopra, Anil K.. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, U.S.A., (1995).
- [12] http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6V4Y-4MVN09B-1-8P&_cdi=5771&_user=2460038&_orig=search&_coverDate=07%2F31%2F2007&_sk=999729992&_view=c&_wchp=dGLbVIW-zSkzS&md5=b14be08165413c132db8d07b9f43d104&ie=/sdarticle.pdf. Março.
- [13] <http://sapientia.ualg.pt/bitstream/10400.1/85/1/ESTAva.pdf>. Maio de 2009.
- [14] Faria, Rui Manuel. *Avaliação do Comportamento Sísmico de Barragens de Betão através de um Modelo de Dano Continuo*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, (1994).
- [17] Matos Fernandes, Manuel. *Mecânica dos Solos II volume*. Sebenta da disciplina de Mecânica dos Solos II, Faculdade de Engenharia d Universidade do Porto, Porto, (1995).
- [18] <http://206.191.29.67/english/pdf/conf2006/s016/hajek.pdf>. Março de 2009.
- [19] http://www.csiberkeley.com/Tech_Info/19.pdf. Maio de 2009.
- [20] http://bath.eprints.org/6512/1/pag73-86-Jos_%20Cunha.pdf. Maio de 2009.
- [21] http://paginas.fe.up.pt/~geng/ge/apontamentos/Cap_3_GE.pdf. Maio de 2009.
- [22] <http://www.cganda.com/pdf/Amick-Bayat-ASCE98.pdf>. Março de 2009.

- [23] <http://www.cganda.com/pdf/Amick-NoiseCon90.pdf>. Março de 2009.
- [24] <http://www.physics.berkeley.edu/research/packard/related/Vibrations/Gordon-SPIE99.pdf>. Março de 2009.
- [25] <http://www.cganda.com/pdf/Gordon-Wu-FFU.pdf>. Março de 2009.
- [26] http://www.colingordon.com/pdf/HA_MG_TB_CG_Evolving_Criteria_SPIE2005.pdf. Março de 2009.
- [27] <http://www.colingordon.com/pdf/HA-MG-CG-Taiwan-Nano-2002.pdf>. Março de 2009.
- [28] http://www.civil.ist.utl.pt/~luisg/textos/isolamento_mest.pdf. Maio de 2009.
- [29] http://books.google.pt/books?id=wRxhiHfieIC&dq=lateral+infinite+boundary&source=gbs_navlinks. Maio de 2009.
- [30] http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano5/aae/pdf/Apontamentos/Cap10_Solid_EPD_Axis.pdf. Maio de 2009.

ANEXO A1

**DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS MECÂNICOS DOS
ESTRATOS ROCHA DECOMPOSTA E ROCHA ALTERADA
A PARTIR DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO ENSAIO
SPT**

Quadro A1 – Obtenção dos parâmetros E e $G_{\text{máx}}$ a partir dos resultados obtidos pelo ensaio SPT realizados em três locais distintos segundo o corte longitudinal que se modelou – referentes aos estratos rocha decomposta e rocha alterada

z (m)	N(SPT)	Correcção energia	Correcção comprimento vara	Correcção diâmetro furo	σ'_{v0} (kN/m ²)	Cn	(N ₁) ₆₀	ν	I _D (Skempton)		D _r (%)	K _{2,máx}	G _{máx} (kPa)	E (kPa)
6	18	1	1	0,85	83,57	1,1	16,7	0,22	35-65	medianamente compacta	50,42	9,425048	86160,61	210231,9
9	51	1	1	0,95	143,57	0,8	40,4	0,22	65-85	compacta ou densa	83,16	14,20549	170211,2	415315,3
12	60	1	1	1	207,57	0,7	41,6	0,2	65-85	compacta ou densa	84,58	14,43329	207944,5	499066,9
15	60	1	1	1	273,57	0,6	36,3	0,2	65-85	compacta ou densa	78,27	13,4225	222007,6	532818,2
6	13	1	1	0,85	88,48	1,1	11,7	0,22	35-65	medianamente compacta	41,61	8,896813	83684,45	204190
9	30	1	1	0,95	148,48	0,8	23,4	0,22	35-65	medianamente compacta	62,16	11,83154	144167,6	351769
12	46	1	1	1	208,48	0,7	31,9	0,22	65-85	compacta ou densa	73,07	12,70693	183471,1	447669,4
15	19	1	1	1	268,48	0,6	11,6	0,22	35-65	medianamente compacta	41,35	8,880734	145512,7	355050,9
18	60	1	1	1	330,48	0,6	33,0	0,2	65-85	compacta ou densa	74,42	12,84178	233450,4	560281
6	14	1	1	0,85	94,83	1,0	12,2	0,22	35-65	medianamente compacta	42,45	8,946815	87125,86	212587,1
9	11	1	1	0,95	154,83	0,8	8,4	0,22	35-65	medianamente compacta	35,70	8,198374	102013,8	248913,6
12	60	1	1	1	216,83	0,7	40,7	0,2	65-85	compacta ou densa	83,53	14,26403	210041,1	504098,6
15	60	1	1	1	282,83	0,6	35,7	0,2	65-85	compacta ou densa	77,56	13,30976	223838,6	537212,6
18	60	1	1	1	348,83	0,5	32,1	0,2	65-85	compacta ou densa	73,38	12,73823	237912,7	570990,5

ANEXO A2

**MACRO DESENVOLVIDA PARA A GERAÇÃO DO MODELO
BIDIMENSIONAL**


```

/FILNAME, 2D_LONG
/TITLE, 2D_LONG
/PREP7

```

!DEFINIÇÃO DOS TIPOS DE ELEMENTOS

ET, 1, PLANE183 !Solo, ensoleiramento e pavimento
KEYOPT, 1, 3, 2
KEYOPT, 1, 6, 0
KEYOPT, 1, 10, 0

ET, 2, COMBIN14 !Amortecedores viscosos
KEYOPT, 2, 1, 0
KEYOPT, 2, 2, 0
KEYOPT, 2, 3, 2

ET, 3, BEAM3 !Pilares e vigas dos pórticos
KEYOPT, 3, 6, 0
KEYOPT, 3, 9, 0
KEYOPT, 3, 10, 0

!SOLO1

MP, EX, 1, 15e6	!E=15 MPa
MP, PRXY, 1, 0.4	!coef. Poisson=0.4
MP, DENS, 1, 1937	!massa volumica=1937kg/m3

!SOLO2

MP, EX, 2, 10e6	!E=10 MPa
MP, PRXY, 2, 0.45	!coef. Poisson=0.45
MP, DENS, 2, 1835	!massa volumica=1835kg/m3

!SOLO3

MP, EX, 3, 20e6	!E=20 MPa
MP, PRXY, 3, 0.25	!coef. Poisson=0.25
MP, DENS, 3, 1937	!massa volumica=1937kg/m3

!SOLO4

MP, EX, 4, 210e6	!E=210 MPa
MP, PRXY, 4, 0.22	!coef. Poisson=0.22
MP, DENS, 4, 2039	!massa volumica=2039kg/m3

!SOLO5

MP, EX, 5, 250e6

!E=250 MPa

MP, PRXY, 5, 0.22

!coef. Poisson=0.22

MP, DENS, 5, 2039

!massa volumica=2039kg/m3

!SOLO6

MP, EX, 6, 400e6

!E=400 MPa

MP, PRXY, 6, 0.22

!coef. Poisson=0.22

MP, DENS, 6, 2039

!massa volumica=2039kg/m3

!SOLO7

MP, EX, 7, 530e6

!E=530 MPa

MP, PRXY, 7, 0.2

!coef. Poisson=0.2

MP, DENS, 7, 2243

!massa volumica=2243kg/m3

!SOLO8

MP, EX, 8, 1000e6

!E=1000 MPa

MP, PRXY, 8, 0.15

!coef. Poisson=0.15

MP, DENS, 8, 2450

!massa volumica=2450kg/m3

!Ensoleiramento

MP, EX, 9, 33e9

!E=33 MPa

MP, PRXY, 9, 0.3

!coef. Poisson=0.3

MP, DENS, 9, 2446

!massa volumica=2446kg/m3

!BETÃO LIMPEZA

MP, EX, 10, 33e9

!E=33 MPa

MP, PRXY, 10, 0.3

!coef. Poisson=0.3

MP, DENS, 10, 2400

!massa volumica=2400kg/m3

!PILARES DOS PÓRTICOS

MP, EX, 11, 33e9

!E=33 GPa

MP, PRXY, 11, 0.3

!coef. Poisson=0.3

MP, DENS, 11, 2500

!massa volumica=2500 kg/m3

!VIGAS DOS PÓRTICOS

MP, EX, 12, 33e9

!E=33 GPa

MP, PRXY, 12, 0.3

!coef. Poisson=0.3

MP, DENS, 12, 2500

!massa volumica=2500 kg/m3

!BETÃO BETUMINOSO

MP, EX, 13, 5e9	!E=5 GPa
MP, PRXY, 13, 0.4	!coef. Poisson=0.4
MP, DENS, 13, 2360	!massa volumica= 2360kg/m3

!... BETUMINOSA EM MISTURA DENSA

MP, EX, 14, 4.5e9	!E= 4.5GPa
MP, PRXY, 14, 0.4	!coef. Poisson=0.4
MP, DENS, 14, 2350	!massa volumica= 2350 kg/m3

!MACADAME BETUMINOSO

MP, EX, 15, 4e9	!E= 4GPa
MP, PRXY, 15, 0.4	!coef. Poisson=0.4
MP, DENS, 15, 2260	!massa volumica= 2260 kg/m3

!M.G.E

MP, EX, 16, 630e6	!E= 630MPa
MP, PRXY, 16, 0.35	!coef. Poisson=0.35
MP, DENS, 16, 1850	!massa volumica= 1850 kg/m3

!AMORTECEDORES

cvn1=232254.73	!Alterar conforme o solo a considerar
cvt1=65996.76	
MP, EX, 17, 30e9	!E= x
MP, PRXY, 17, 0.2	!coef. Poisson= x
MP, DENS, 17, 2500	!massa volumica= x

!AMORTECEDORES

cvn2=232254.73	!Alterar conforme o solo a considerar
cvt2=65996.76	
MP, EX, 18, 30e9	!E= x
MP, PRXY, 18, 0.2	!coef. Poisson= x
MP, DENS, 18, 2500	!massa volumica= x

!AMORTECEDORES

cvn3=242797.24	!Alterar conforme o solo a considerar
cvt3=48654.01	
MP, EX, 19, 30e9	!E= x
MP, PRXY, 19, 0.2	!coef. Poisson= x
MP, DENS, 19, 2500	!massa volumica= x

!AMORTECEDORES

cvn4=650459.00	!Alterar conforme o solo a considerar
cv4=298549.57	
MP, EX, 20, 30e9	!E= x
MP, PRXY, 20, 0.2	!coef. Poisson= x
MP, DENS, 20, 2500	!massa volumica= x
!AMORTECEDORES	
cvn5=897718.70	!Alterar conforme o solo a considerar
cv5=412037.56	
MP, EX, 21, 30e9	!E= x
MP, PRXY, 21, 0.2	!coef. Poisson= x
MP, DENS, 21, 2500	!massa volumica= x
!AMORTECEDORES	
cvn6=1068086.09	!Alterar conforme o solo a considerar
cv6=504729.27	
MP, EX, 22, 30e9	!E= x
MP, PRXY, 22, 0.2	!coef. Poisson= x
MP, DENS, 22, 2500	!massa volumica= x
!AMORTECEDORES	
cvn7=1068086.09	!Alterar conforme o solo a considerar
cv7=504729.27	
MP, EX, 23, 30e9	!E= x
MP, PRXY, 23, 0.2	!coef. Poisson= x
MP, DENS, 23, 2500	!massa volumica= x
!AMORTECEDORES	
cvn8=1489745.51	!Alterar conforme o solo a considerar
cv8=749967.50	
MP, EX, 24, 30e9	!E= x
MP, PRXY, 24, 0.2	!coef. Poisson= x
MP, DENS, 24, 2500	!massa volumica= x
!AMORTECEDORES	
cvn9=1489745.51	!Alterar conforme o solo a considerar
cv9=749967.50	
MP, EX, 25, 30e9	!E= x
MP, PRXY, 25, 0.2	!coef. Poisson= x
MP, DENS, 25, 2500	!massa volumica= x

!AMORTECEDORES

cvn10=1489745.51

!Alterar conforme o solo a considerar

cvt10=749967.50

MP, EX, 26, 30e9

!E= x

MP, PRXY, 26, 0.2

!coef. Poisson= x

MP, DENS, 26, 2500

!massa volumica= x

!GEOMETRIA (SOLO E ENSOLEIRAMENTO)-----

k, 1, 0.0, 177.0

k, 2, 0.0, 176.94

k, 3, 0.0, 176.86

k, 4, 0.0, 176.76

k, 5, 0.0, 176.4

...

k, 240, 192.0, 157.2

k, 241, 192.0, 118.8

L, 1, 2

! Line conecting keypoints 1&2

L, 2, 3

L, 3, 4

L, 4, 5

L, 5, 6

...

L, 223, 240

L, 224, 241

AL, 1, 229, 20, 230

! Area defined by lines

AL, 2, 230, 21, 231

AL, 3, 231, 22, 232

...

AL, 211, 441, 227, 442

AL, 212, 442, 228, 443

!MALHA (SOLO E ENSOLEIRAMENTO)-----

TYPE, 1

MAT, 13

LESIZE, 1, 0.06

LESIZE, 229, 0.3

LESIZE, 20, 0.06

LESIZE, 230, 0.3

AMESH, 1

TYPE, 1

MAT, 14

LESIZE, 2, 0.08

LESIZE, 230, 0.3

LESIZE, 21, 0.08

LESIZE, 231, 0.3

AMESH, 2

TYPE, 1

MAT, 15

LESIZE, 3, 0.1

LESIZE, 231, 0.3

LESIZE, 22, 0.1

LESIZE, 232, 0.3

AMESH, 3

...

TYPE, 1

MAT, 8

LESIZE, 211, 1.2

LESIZE, 441, 0.3

LESIZE, 227, 1.2

LESIZE, 442, 0.3

AMESH, 202

TYPE, 1

MAT, 8

LESIZE, 212, 2.4

LESIZE, 442, 0.3

LESIZE, 228, 2.4

LESIZE, 443, 0.3

AMESH, 203

!AMORTECEDORES VISCOSOS (NORMAIS E TANGENCIAIS)-----

ltot=192.0

ha1=177.0

h1=0.0

h2=0.9

h3=3.9

h4=6.0

h5=10.2

h6=13.8

h7=15

h8=19.8

h9=58.2

h10=0.0

camort=0.10

!Comprimento dos amortecedores

hms1=0.0

hms2=0.15

*DO, j1, 1, 5, 1

! ENTRE CADA CAMADA

R, j1, , cvn1*(hms2)

TYPE, 2

MAT, 17

REAL, j1

N, , ltot+camort, 177.0-hms2*j1

S1=NODE(ltot+camort, 177.0-hms2*j1, 0)

S2=NODE(ltot, 177.0-hms2*j1, 0)

E, S1, S2

D, S1, ALL, 0

R, j1+5, , cvt1*(hms2)

TYPE, 2

MAT, 17
REAL, j1+5

N, , ltot, 177.0-hms2*j1-camort
S3=NODE(ltot, 177.0-hms2*j1-camort, 0)
E, S3, S2
D, S3, ALL, 0

*ENDDO

rt1=5+j1

*DO, j2, 1, 19, 1 ! ENTRE CADA CAMADA

R, rt1+j2, , cvn3*(hms2)
TYPE, 2
MAT, 19
REAL, rt1+j2

N, , ltot+camort, 176.1-hms2*j2
S1=NODE(ltot+camort, 176.1-hms2*j2, 0)
S2=NODE(ltot, 176.1-hms2*j2, 0)
E, S1, S2
D, S1, ALL, 0

R, rt1+19+j2, , cvt3*(hms2)
TYPE, 2
MAT, 19
REAL, rt1+19+j2

N, , ltot, 176.1-hms2*j2-camort
S3=NODE(ltot, 176.1-hms2*j2-camort, 0)
E, S3, S2
D, S3, ALL, 0

*ENDDO

rt2=rt1+19+j2

*DO, j3, 1, 13, 1 ! ENTRE CADA CAMADA

R, rt2+j3, , cvn4*(hms2)

```

TYPE, 2
MAT, 20
REAL, rt2+j3

N, , ltot+camort, 173.1-hms2*j3
S1=NODE(ltot+camort, 173.1-hms2*j3, 0)
S2=NODE(ltot, 173.1-hms2*j3, 0)
E, S1, S2
D, S1, ALL, 0

R, rt2+13+j3, , cvt4*(hms2)
TYPE, 2
MAT, 20
REAL, rt2+13+j3

N, , ltot, 173.1-hms2*j3-camort
S3=NODE(ltot, 173.1-hms2*j3-camort, 0)
E, S3, S2
D, S3, ALL, 0

*ENDDO

rt3=rt2+13+j3
hms5=0.3

*DO, j4, 1, 13, 1                                ! ENTRE CADA CAMADA

R, rt3+j4, , cvn5*(hms5)
TYPE, 2
MAT, 21
REAL, rt3+j4

N, , ltot+camort, 171.0-hms5*j4
S1=NODE(ltot+camort, 171.0-hms5*j4, 0)
S2=NODE(ltot, 171.0-hms5*j4, 0)
E, S1, S2
D, S1, ALL, 0

R, rt3+13+j4, , cvt5*(hms5)
TYPE, 2
MAT, 21

```

REAL, rt3+13+j4

N, , ltot, 171.0-hms5*j4-camort

S3=NODE(ltot, 171.0-hms5*j4-camort, 0)

E, S3, S2

D, S3, ALL, 0

*ENDDO

rt4=rt3+13+j4

*DO, j5, 1, 11, 1 ! ENTRE CADA CAMADA

R, rt4+j5, , cvn6*(hms5)

TYPE, 2

MAT, 22

REAL, rt4+j5

N, , ltot+camort, 166.8-hms5*j5

S1=NODE(ltot+camort, 166.8-hms5*j5, 0)

S2=NODE(ltot, 166.8-hms5*j5, 0)

E, S1, S2

D, S1, ALL, 0

R, rt4+11+j5, , cvt6*(hms5)

TYPE, 2

MAT, 22

REAL, rt4+11+j5

N, , ltot, 166.8-hms5*j5-camort

S3=NODE(ltot, 166.8-hms5*j5-camort, 0)

E, S3, S2

D, S3, ALL, 0

*ENDDO

rt5=rt4+11+j5

hms7=0.6

*DO, j6, 1, 1, 1 ! ENTRE CADA CAMADA

R, rt5+j6, , cvn6*(hms7)

TYPE, 2

MAT, 22

REAL, rt5+j6

N, , ltot+camort, 163.2-hms7*j6

S1=NODE(ltot+camort, 163.2-hms7*j6, 0)

S2=NODE(ltot, 163.2-hms7*j6, 0)

E, S1, S2

D, S1, ALL, 0

R, rt5+1+j6, , cvt6*(hms7)

TYPE, 2

MAT, 22

REAL, rt5+1+j6

N, , ltot, 163.2-hms7*j6-camort

S3=NODE(ltot, 163.2-hms7*j6-camort, 0)

E, S3, S2

D, S3, ALL, 0

*ENDDO

rt6=rt5+1+j6

*DO, j7, 1, 7, 1

! ENTRE CADA CAMADA

R, rt6+j7, , cvn8*(hms7)

TYPE, 2

MAT, 24

REAL, rt6+j7

N, , ltot+camort, 162.0-hms7*j7

S1=NODE(ltot+camort, 162.0-hms7*j7, 0)

S2=NODE(ltot, 162.0-hms7*j7, 0)

E, S1, S2

D, S1, ALL, 0

R, rt6+7+j7, , cvt8*(hms7)

TYPE, 2

MAT, 24

REAL, rt6+7+j7

N, , ltot, 162.0-hms7*j7-camort

S3=NODE(ltot, 162.0-hms7*j7-camort, 0)

E, S3, S2

D, S3, ALL, 0

*ENDDO

rt7=rt6+7+j7

hms9=1.2

*DO, j8, 1, 31, 1 ! ENTRE CADA CAMADA

R, rt7+j8, , cvn8*(hms9)

TYPE, 2

MAT, 24

REAL, rt7+j8

N, , ltot+camort, 157.2-hms9*j8

S1=NODE(ltot+camort, 157.2-hms9*j8, 0)

S2=NODE(ltot, 157.2-hms9*j8, 0)

E, S1, S2

D, S1, ALL, 0

R, rt7+31+j8, , cvt8*(hms9)

TYPE, 2

MAT, 24

REAL, rt7+31+j8

N, , ltot, 157.2-hms9*j8-camort

S3=NODE(ltot, 157.2-hms9*j8-camort, 0)

E, S3, S2

D, S3, ALL, 0

*ENDDO

hms3=0.15

hms4=0.15

hms6=0.3

hms8=0.6

```
hms10=0.0
rt8=rt7+31+j8
```

```
*DO, i, 1, 9, 1 !Camadas de transição
```

```
R, rt8+i, , cvn%i%*(hms%i%)+cvn%i+1%*(hms%i+1%)
TYPE, 2
MAT,
REAL, rt8+i
```

```
N, , ltot+camort, ha1-h%i%
S1=NODE(ltot+camort, ha1-h%i%, 0)
S2=NODE(ltot, ha1-h%i%, 0)
E, S1, S2
D, S1, ALL, 0
```

```
R, rt8+9+i, , cvt%i%*(hms%i%)+cvt%i+1%*(hms%i+1%)
TYPE, 2
MAT,
REAL, rt8+9+i
```

```
N, , ltot, ha1-h%i%-camort
S3=NODE(ltot, ha1-h%i%-camort, 0)
E, S3, S2
D, S3, ALL, 0
```

```
*ENDDO
```

```
rt9=rt8+i+9
```

```
!PÓRTICOS-----
```

```
!List of Nodes
n, , 66.0, 179.1
n, , 66.0, 185.84
n, , 66.0, 192.08
n, , 71.4, 185.84
n, , 71.4, 192.08
n, , 78.6, 185.84
n, , 78.6, 192.08
```

n, , 85.8, 185.84
 n, , 85.8, 192.08
 n, , 92.4, 185.84
 n, , 92.4, 192.08
 n, , 99.0, 185.84
 n, , 99.0, 192.08
 n, , 105.6, 185.84
 n, , 105.6, 192.08
 n, , 112.2, 185.84
 n, , 112.2, 192.08
 n, , 118.8, 185.84
 n, , 118.8, 192.08

! Real constant set 1

! Area, Izz (flexural Inertia), height 'h'

! A = 0.046, Izz = 0.000342, h = 0.3

r, rt9+1, 0.046, 0.000342, 0.3

TYPE, 3 !Columns

MAT, 11

REAL, rt9+1

e, node (66.0, 172.2, 0), node (66.0, 172.5, 0)
 e, node (66.0, 172.5, 0), node (66.0, 179.1, 0)
 e, node (66.0, 179.1, 0), node (66.0, 185.84, 0)
 e, node (66.0, 185.84, 0), node (66.0, 192.08, 0)
 e, node (71.4, 178.8, 0), node (71.4, 179.1, 0)
 e, node (71.4, 179.1, 0), node (71.4, 185.84, 0)
 e, node (71.4, 185.84, 0), node (71.4, 192.08, 0)
 e, node (78.6, 178.8, 0), node (78.6, 179.1, 0)
 e, node (78.6, 179.1, 0), node (78.6, 185.84, 0)
 e, node (78.6, 185.84, 0), node (78.6, 192.08, 0)
 e, node (85.8, 178.8, 0), node (85.8, 179.1, 0)
 e, node (85.8, 179.1, 0), node (85.8, 185.84, 0)
 e, node (85.8, 185.84, 0), node (85.8, 192.08, 0)
 e, node (92.4, 178.8, 0), node (92.4, 179.1, 0)
 e, node (92.4, 179.1, 0), node (92.4, 185.84, 0)
 e, node (92.4, 185.84, 0), node (92.4, 192.08, 0)
 e, node (99.0, 178.8, 0), node (99.0, 179.1, 0)
 e, node (99.0, 179.1, 0), node (99.0, 185.84, 0)
 e, node (99.0, 185.84, 0), node (99.0, 192.08, 0)

```

e, node (105.6, 178.8, 0), node (105.6, 179.1, 0)
e, node (105.6, 179.1, 0), node(105.6, 185.84, 0)
e, node (105.6, 185.84, 0), node (105.6, 192.08, 0)
e, node (112.2, 178.8, 0), node (112.2, 179.1, 0)
e, node (112.2, 179.1, 0), node (112.2, 185.84, 0)
e, node (112.2, 185.84, 0), node (112.2, 192.08, 0)
e, node (118.8, 178.8, 0), node (118.8, 179.1, 0)
e, node (118.8, 179.1, 0), node(118.8, 185.84, 0)
e, node (118.8, 185.84, 0), node (118.8, 192.08, 0)

```

```

! Real constant set 2

```

```

! Area, Izz (flexural Inertia), height 'h'

```

```

! A = 0.32 , Izz = 0.002731, h = 0.32

```

```

r, rt9+2, 0.32, 0.002731, 0.32

```

```

TYPE, 3                                !Beams

```

```

MAT, 12

```

```

REAL, rt9+2

```

```

e, node (66.0, 192.08, 0), node (71.4, 192.08, 0)
e, node (66.0, 185.84, 0), node (71.4, 185.84, 0)
e, node (66.0, 179.1, 0), node (71.4, 179.1, 0)
e, node (71.4, 192.08, 0), node (78.6, 192.08, 0)
e, node (71.4, 185.84, 0), node (78.6, 185.84, 0)
e, node (78.6, 192.08, 0), node (85.8, 192.08, 0)
e, node (78.6, 185.84, 0), node (85.8, 185.84, 0)
e, node (85.8, 192.08, 0), node (92.4, 192.08, 0)
e, node (85.8, 185.84, 0), node (92.4, 185.84, 0)
e, node (92.4, 192.08, 0), node (99.0, 192.08, 0)
e, node (92.4, 185.84, 0), node (99.0, 185.84, 0)
e, node (99.0, 192.08, 0), node (105.6, 192.08, 0)
e, node (99.0, 185.84, 0), node (105.6, 185.84, 0)
e, node (105.6, 192.08, 0), node (112.2, 192.08, 0)
e, node (105.6, 185.84, 0), node (112.2, 185.84, 0)
e, node (112.2, 192.08, 0), node (118.8, 192.08, 0)
e, node (112.2, 185.84, 0), node (118.8, 185.84, 0)

```

```

!APOIOS HORIZONTAIS NA FRONTEIRA ESQUERDA

```

```

NSEL, S, LOC, X, 0

```

```

D, ALL, UX, 0

```

NSEL, ALL

!FRONTEIRA INFERIOR (FIRME)

NSEL, S, LOC, Y, 118.8

D, ALL, ALL, 0

NSEL, ALL

NSEL, S, LOC, Y, 177.0, 192.08

!Seleccção dos nós a estudar

CM, nos_long_2, NODE

ALLSEL, ALL, ALL

CMSEL, U, nos_long_2

CM, rest_long_2, NODE

ALLSEL, ALL, ALL

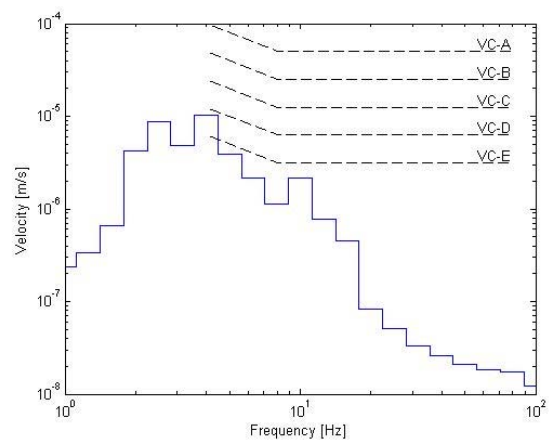
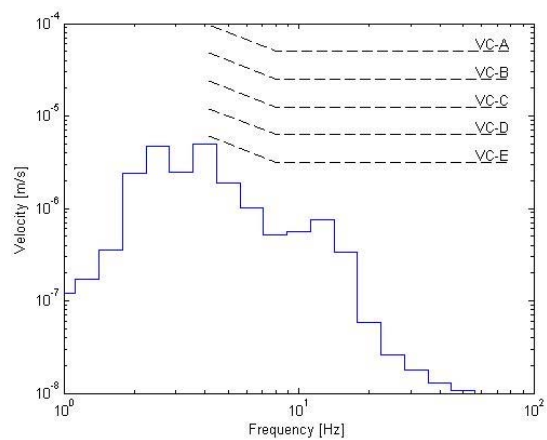
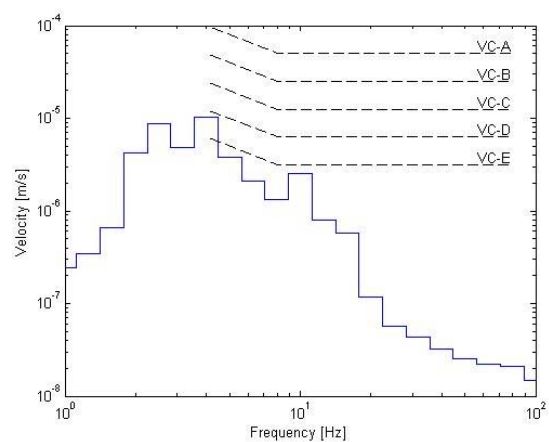
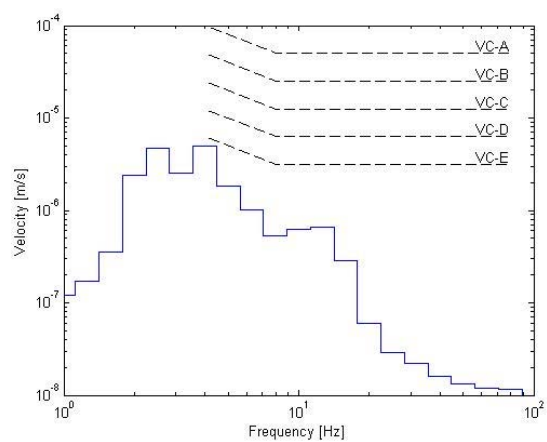
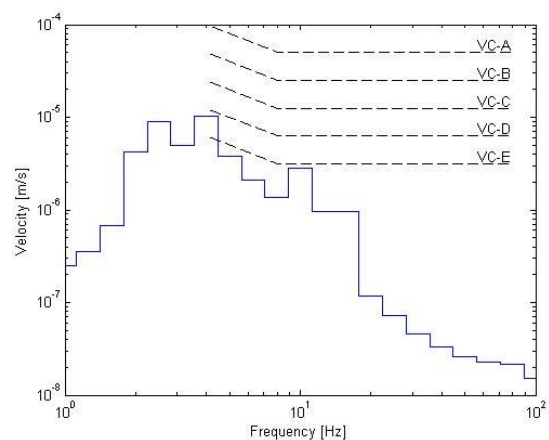
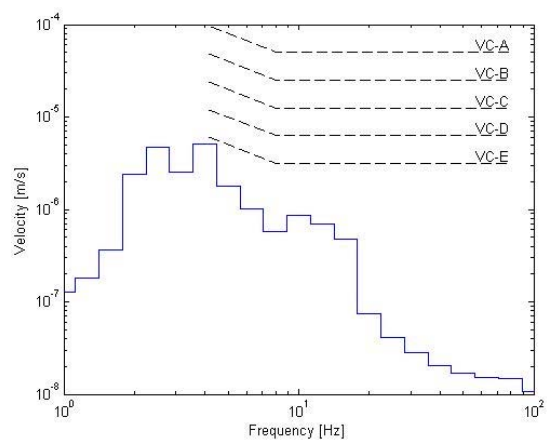
SAVE

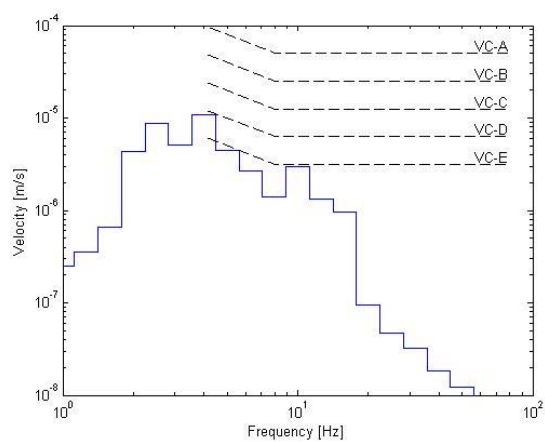
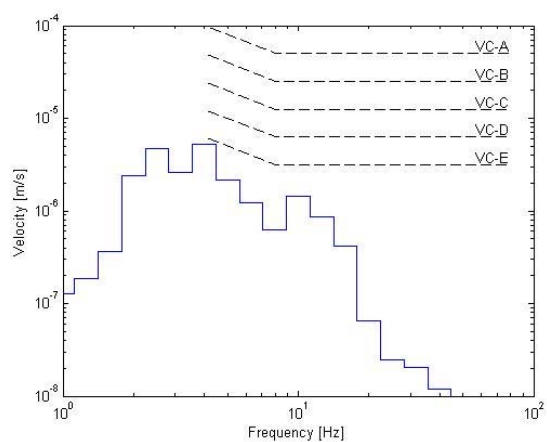
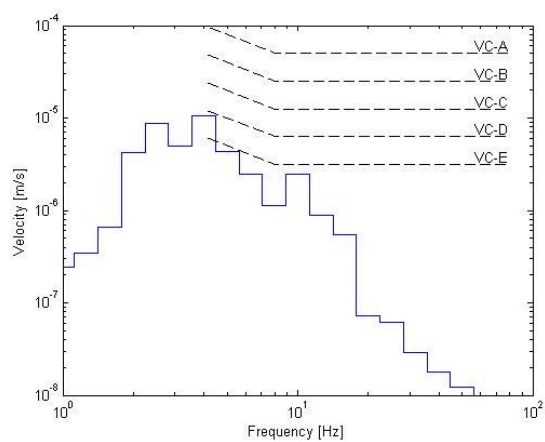
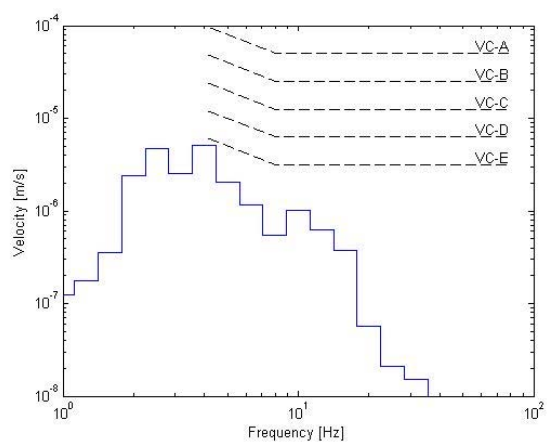
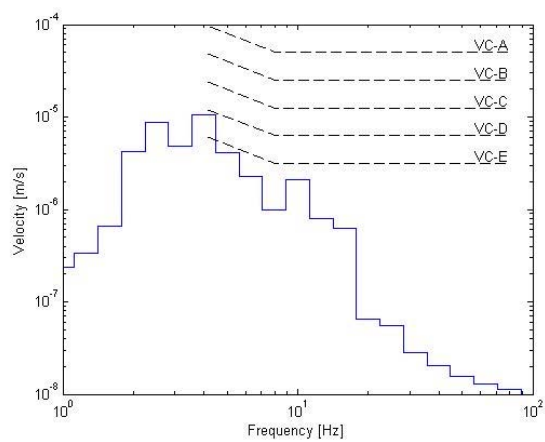
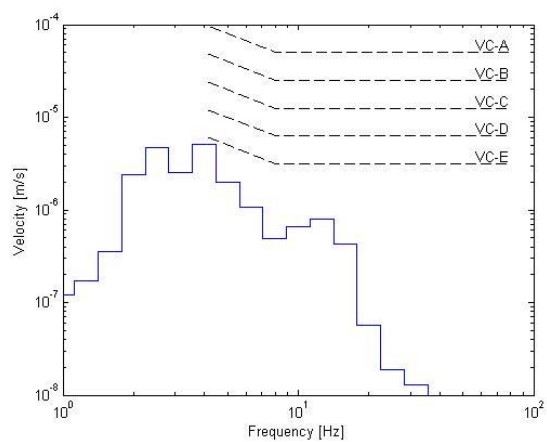
FINISH

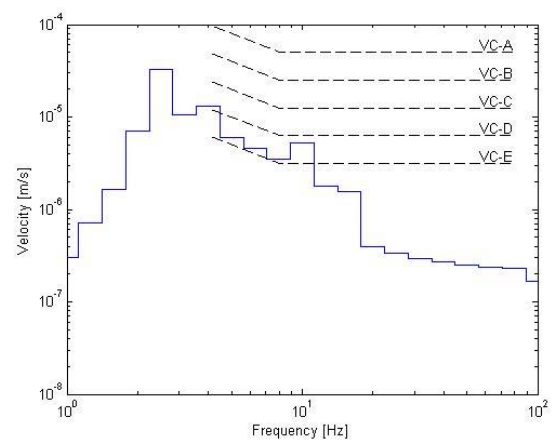
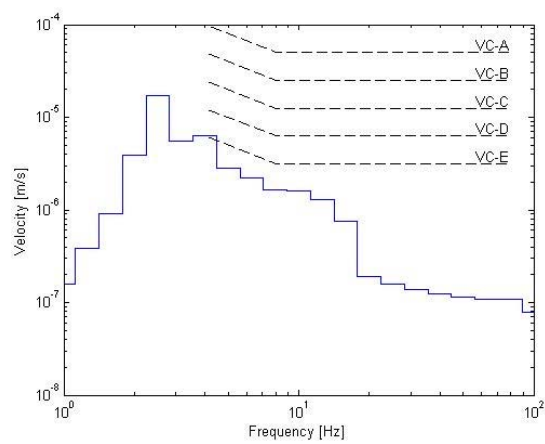
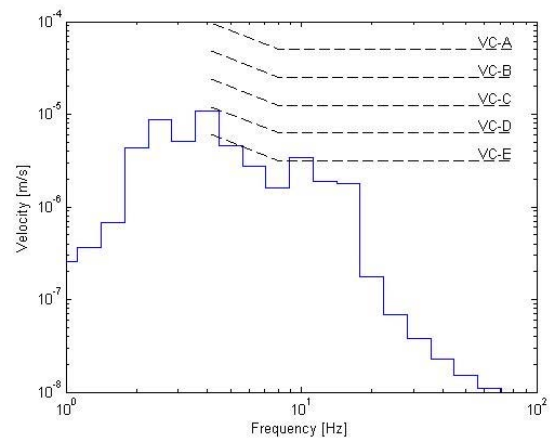
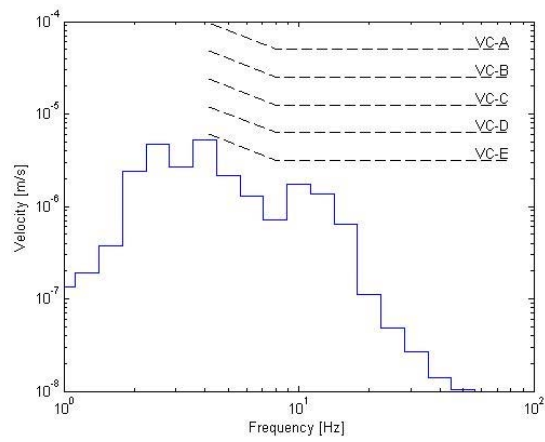
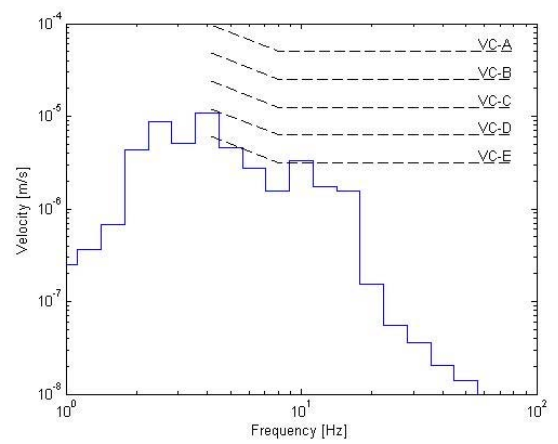
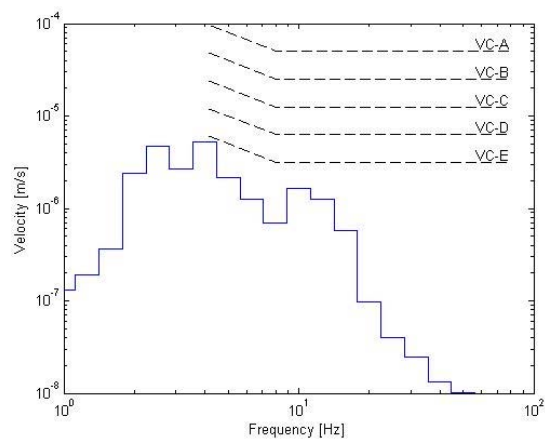
/CONFIG, NRES, 20000

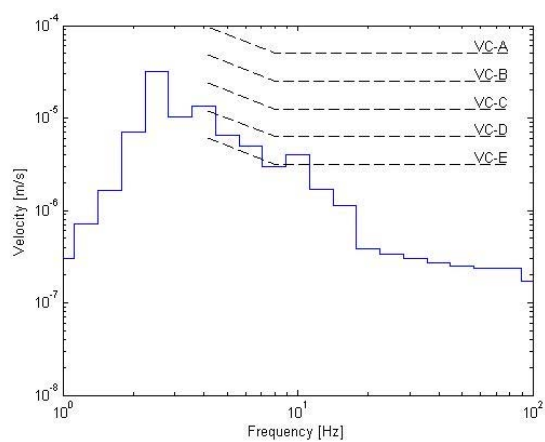
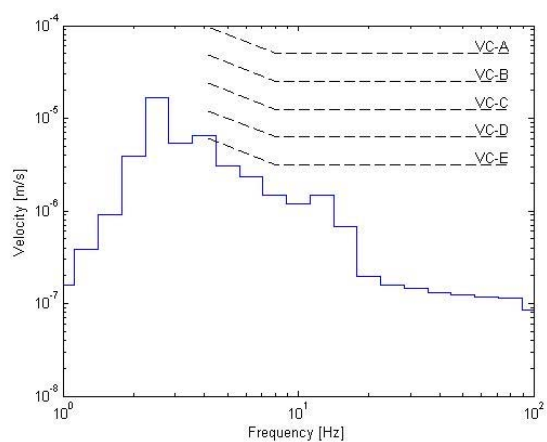
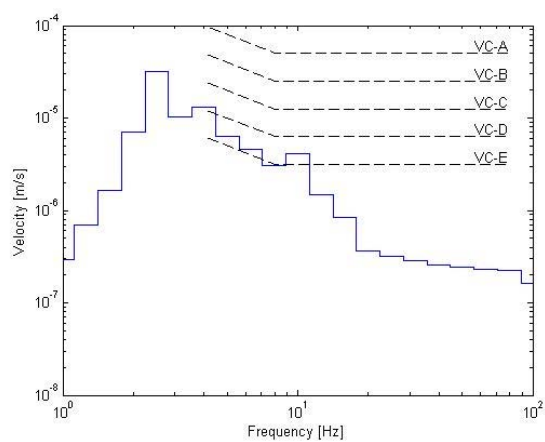
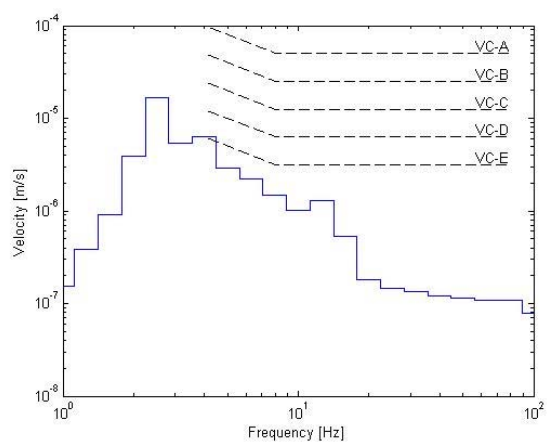
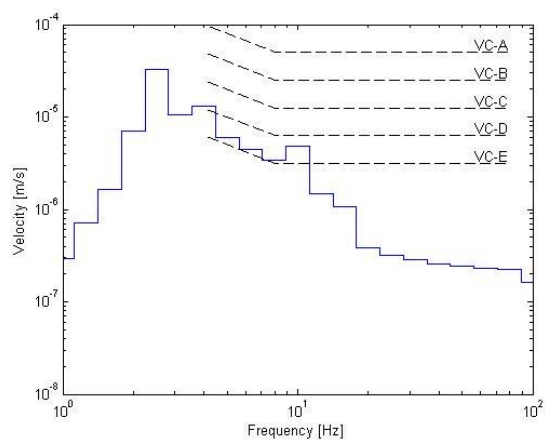
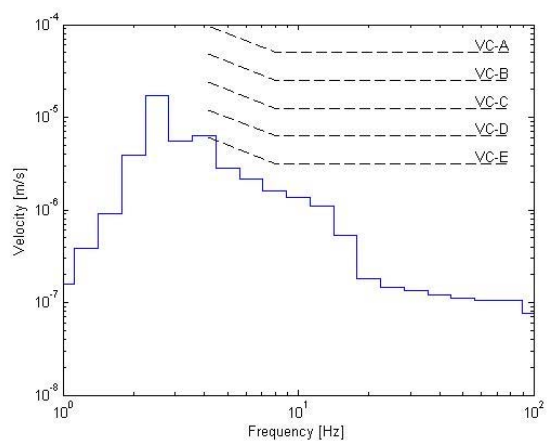
ANEXO A3

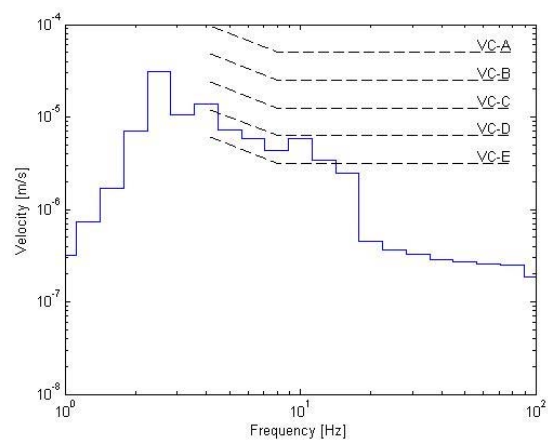
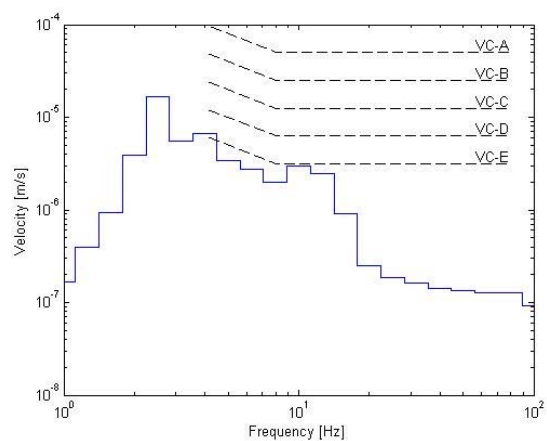
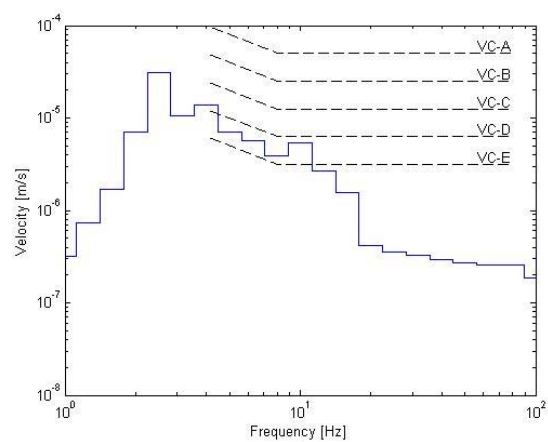
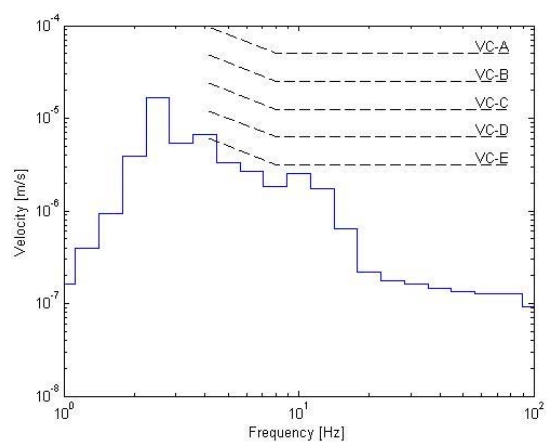
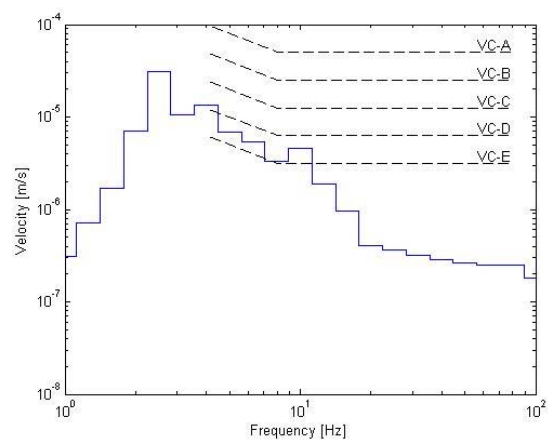
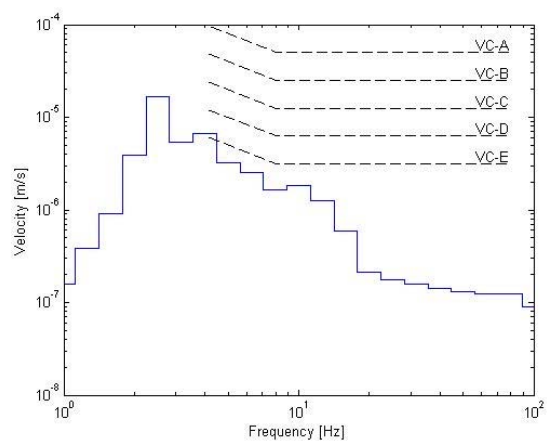
**CONFRONTAÇÃO DOS GRÁFICOS DA VELOCIDADE
QUADRÁTICA MÉDIA EM FUNÇÃO DE BANDAS DE 1/3 DE
OITAVA DA FREQUÊNCIA COM OS CRITÉRIOS
GENÉRICOS DE VIBRAÇÃO**

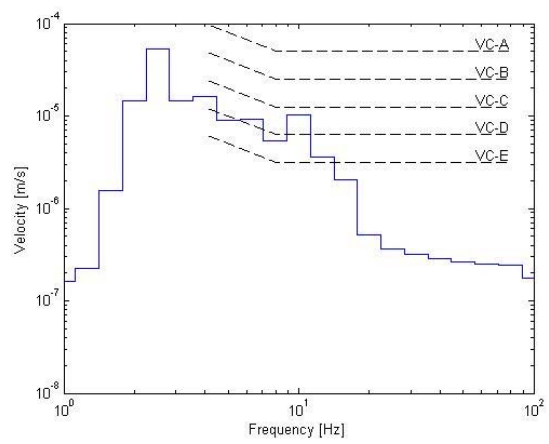
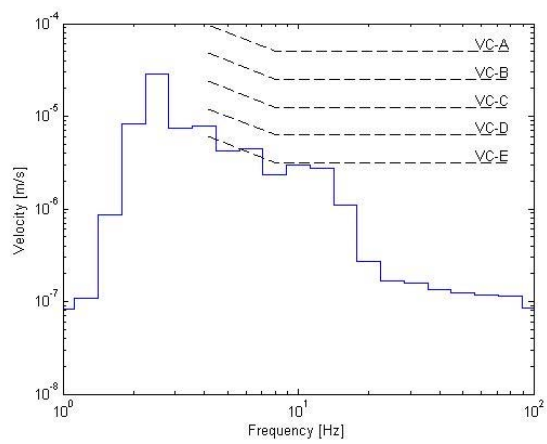
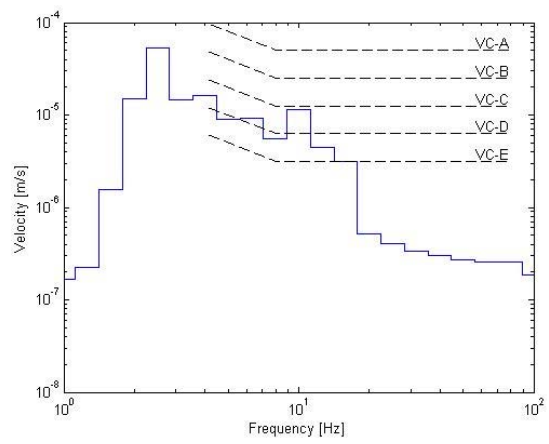
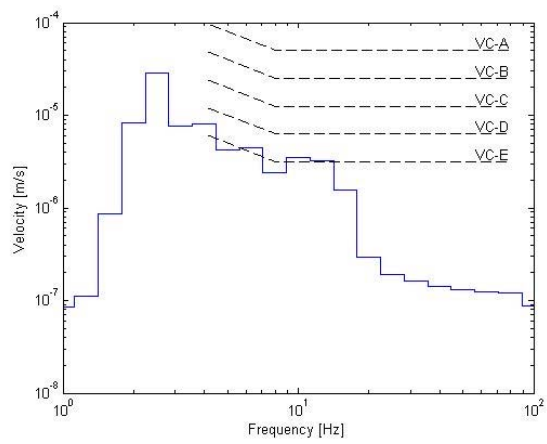
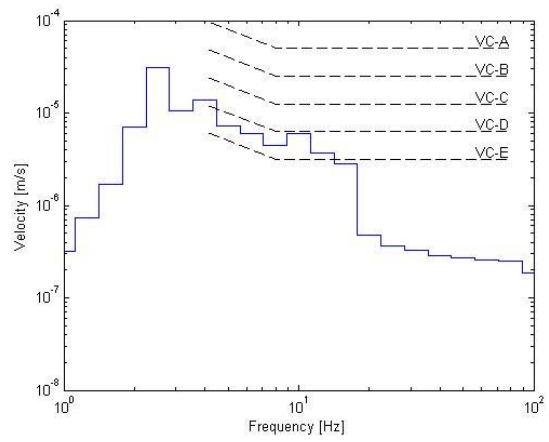
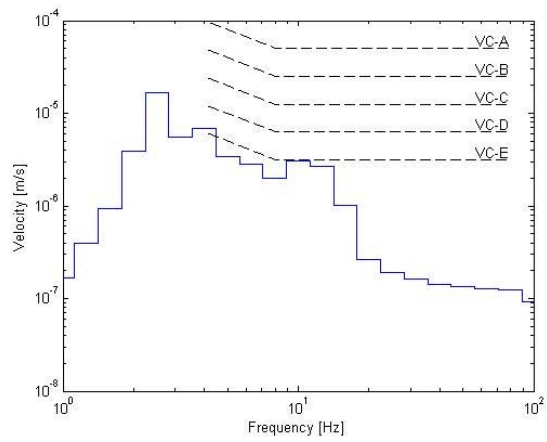


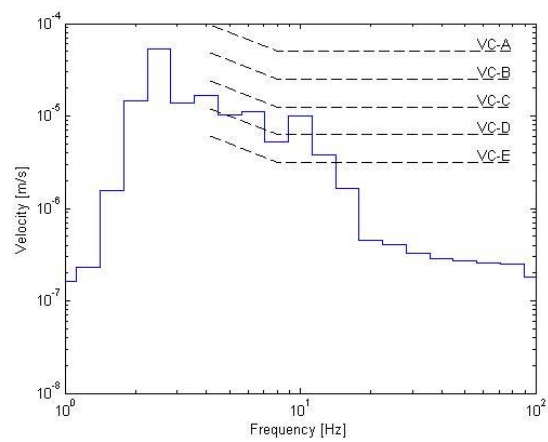
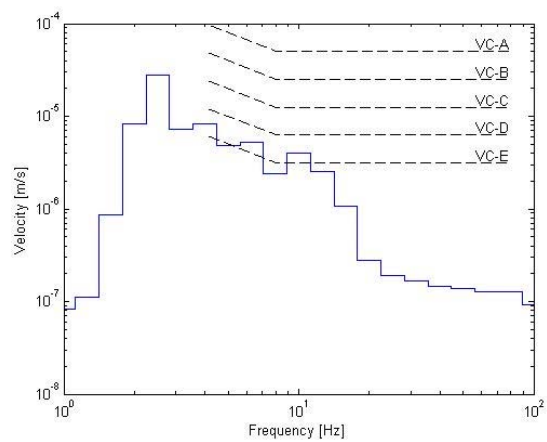
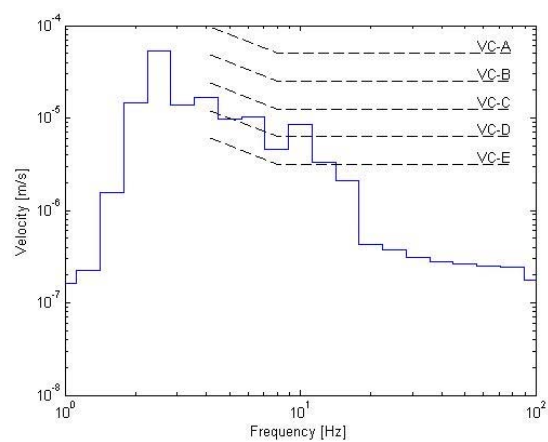
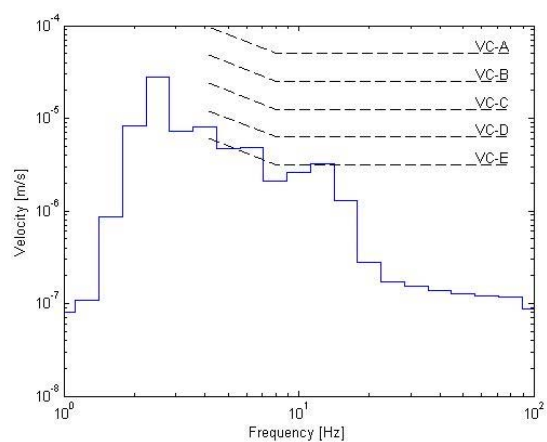
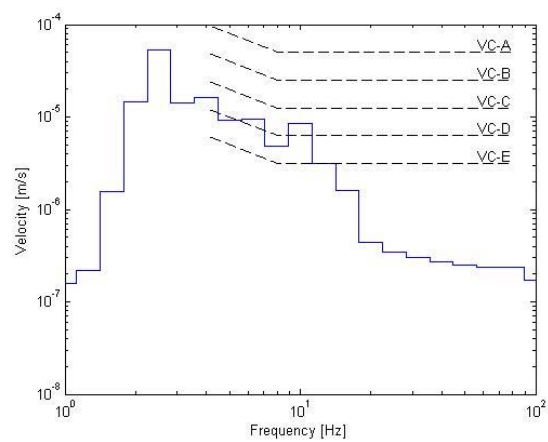
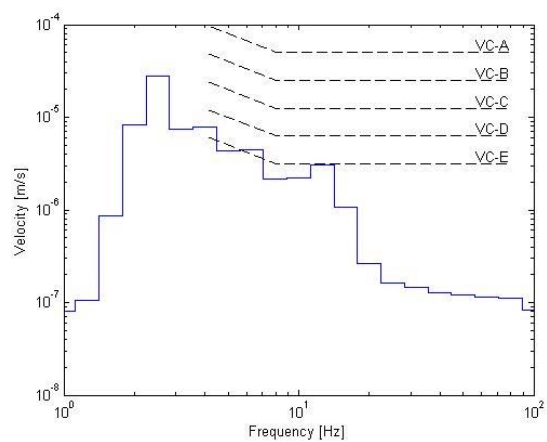


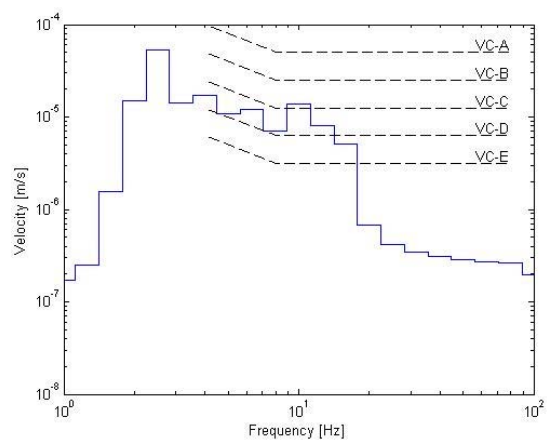
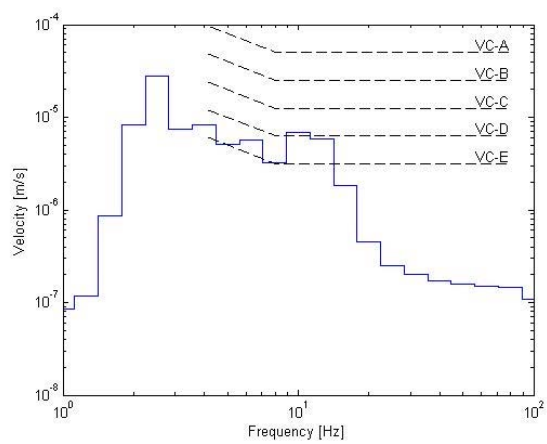
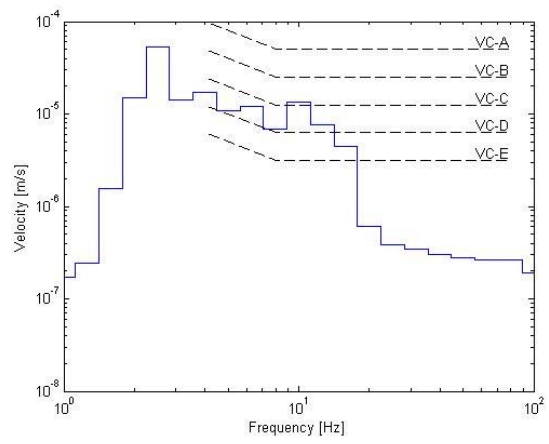
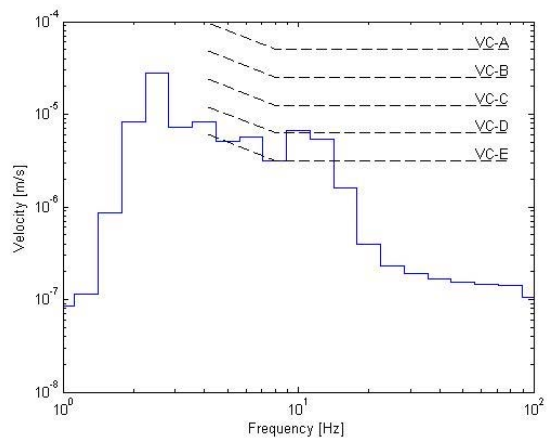
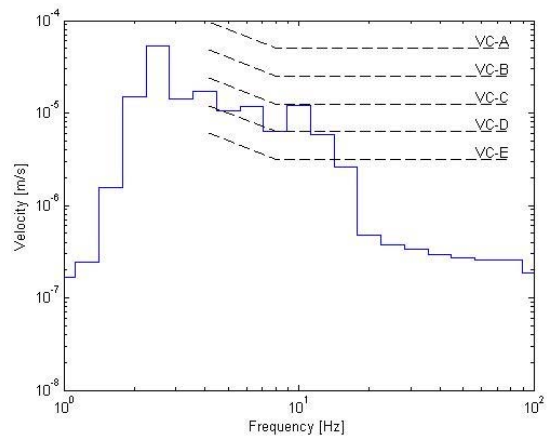
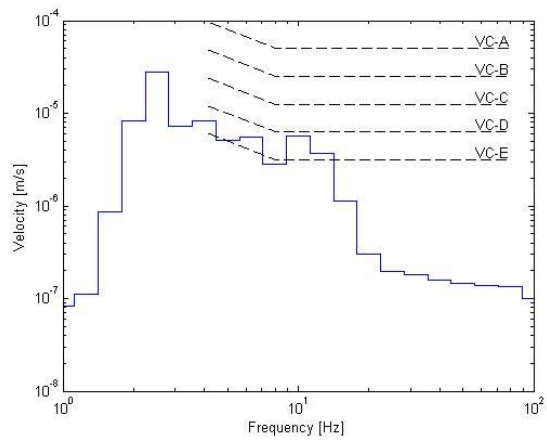


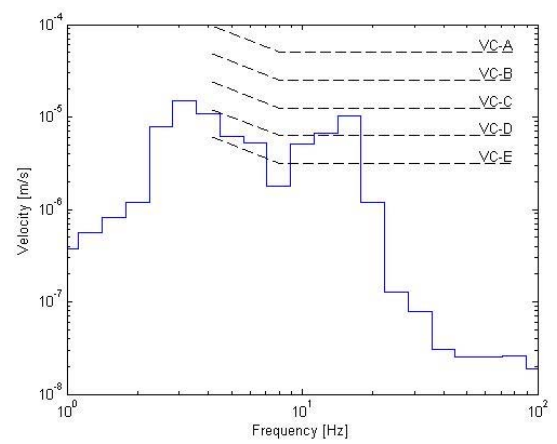
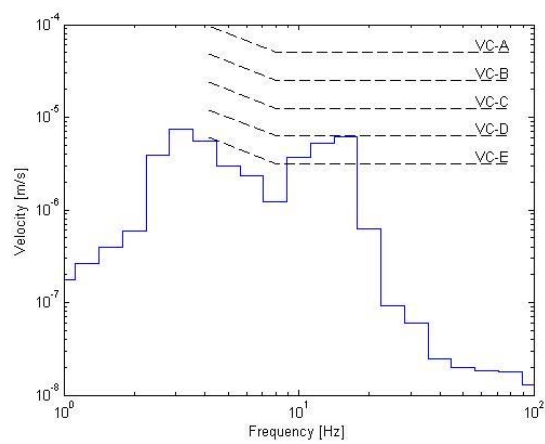
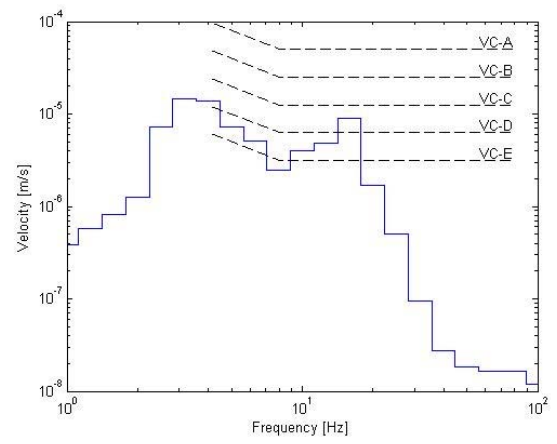
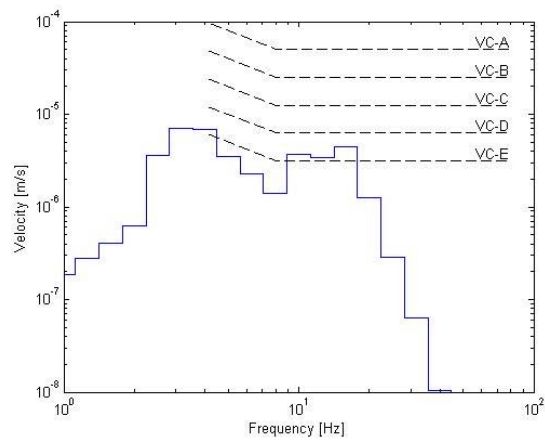
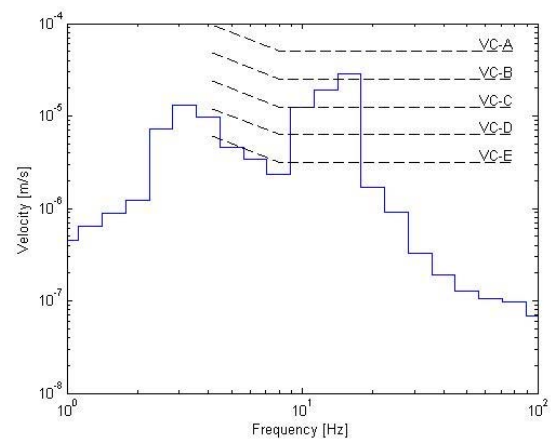
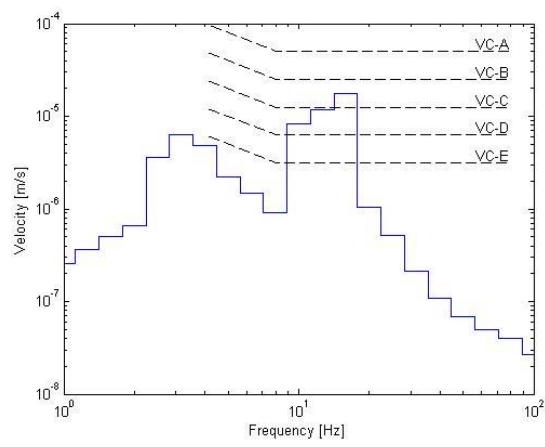


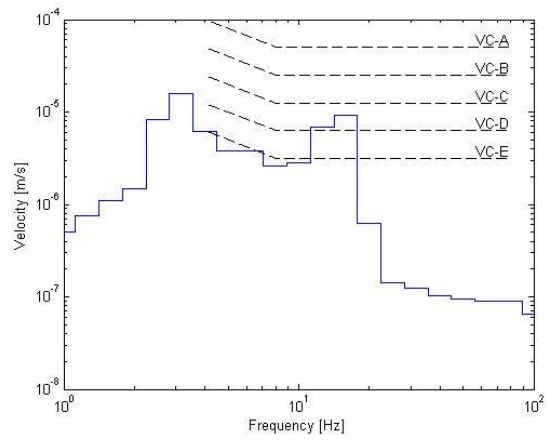
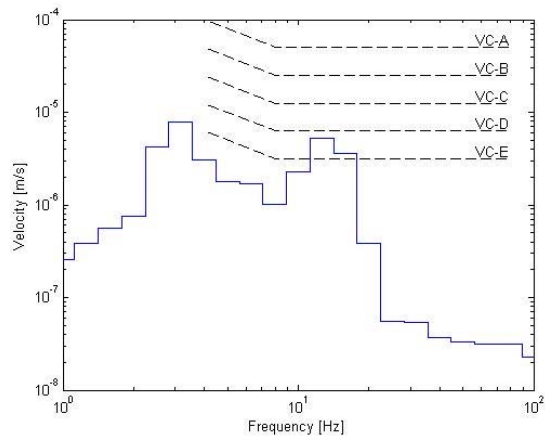
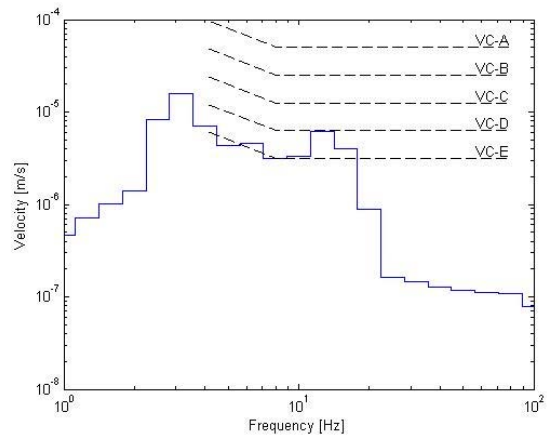
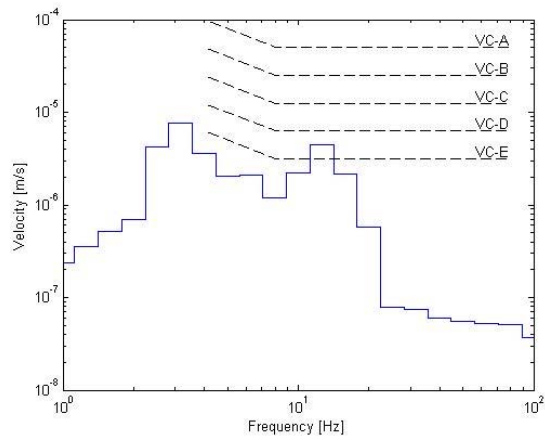
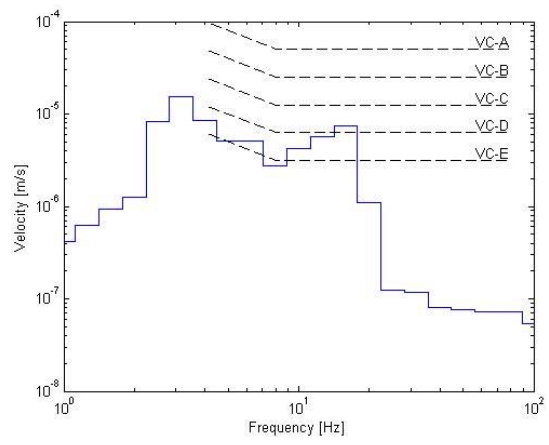
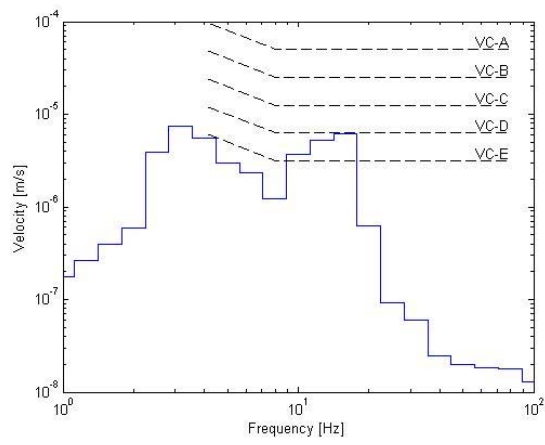


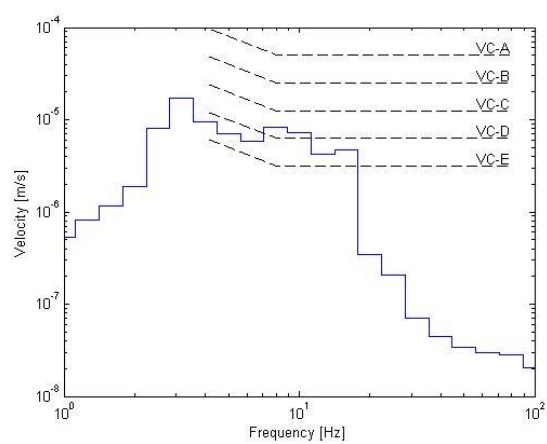
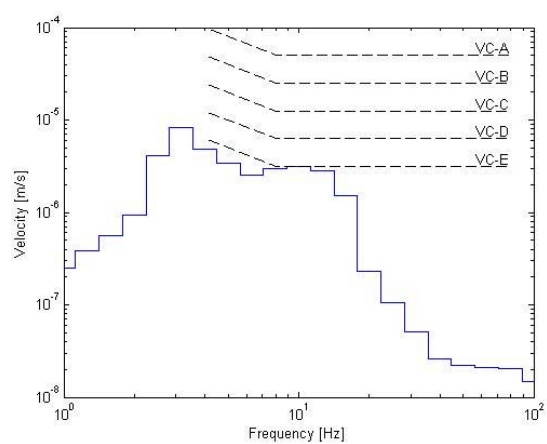
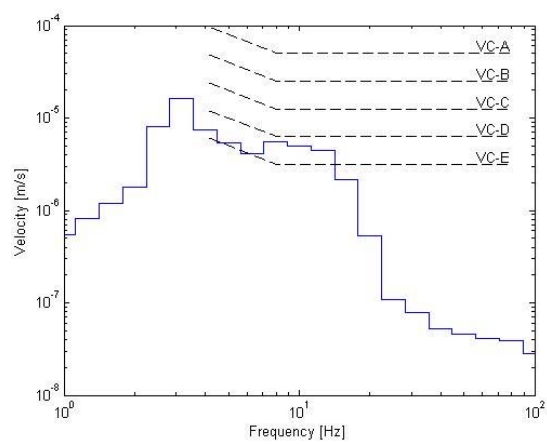
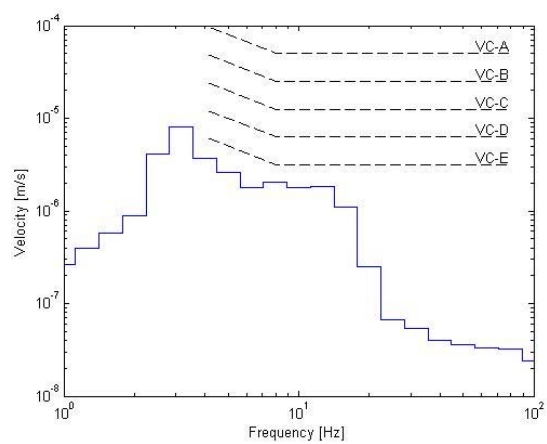
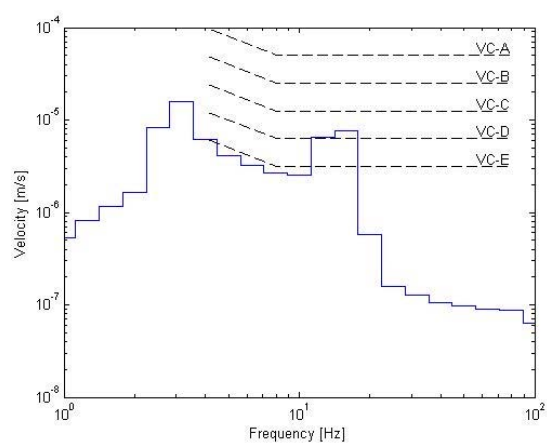
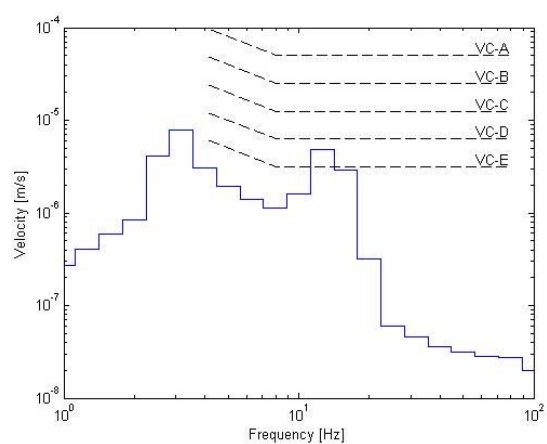


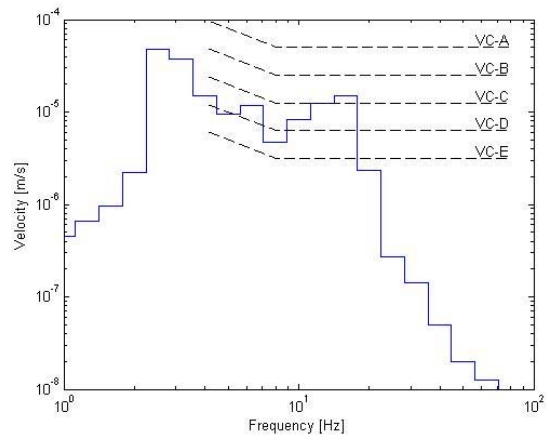
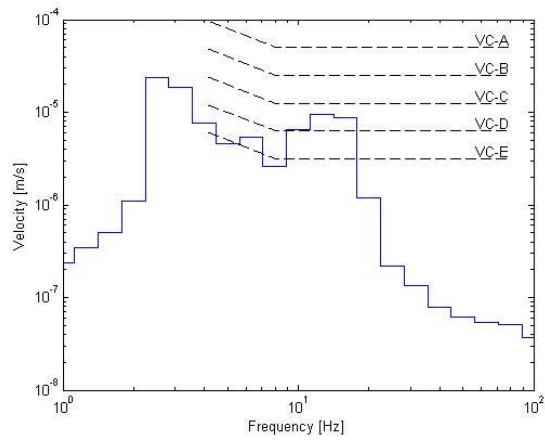
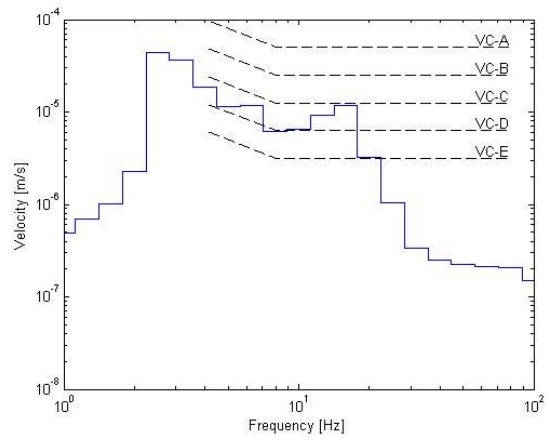
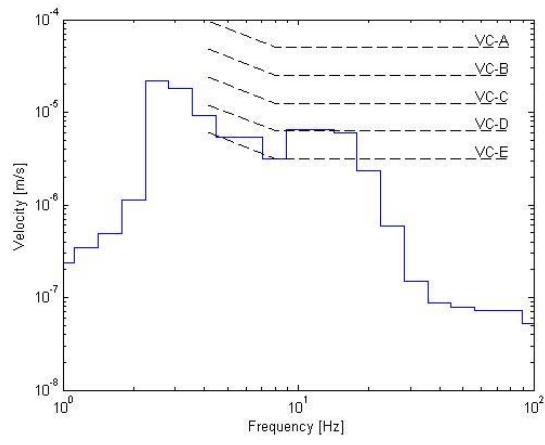
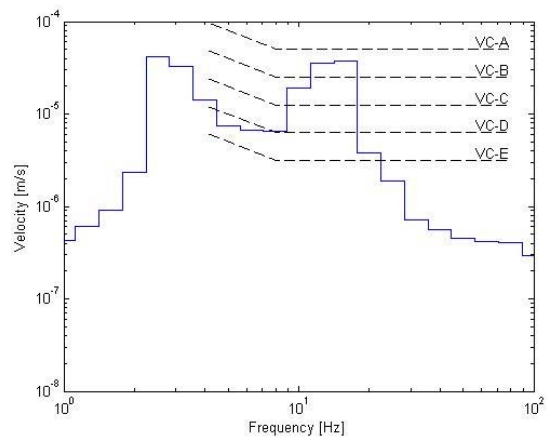
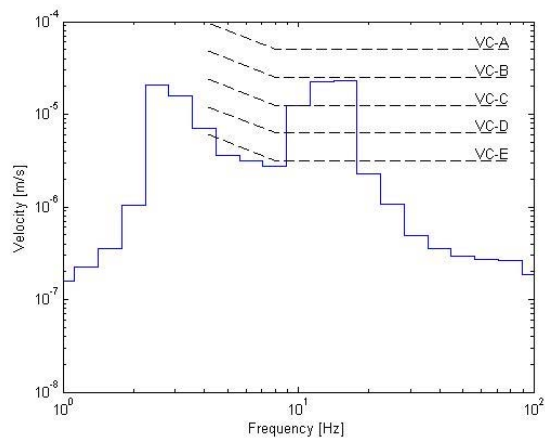


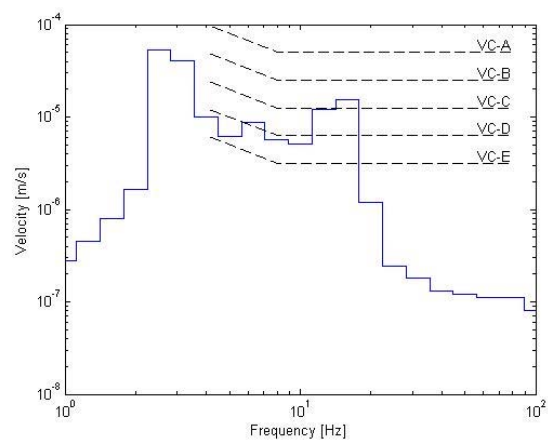
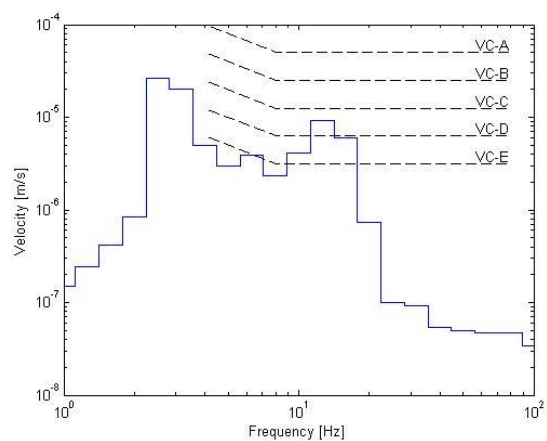
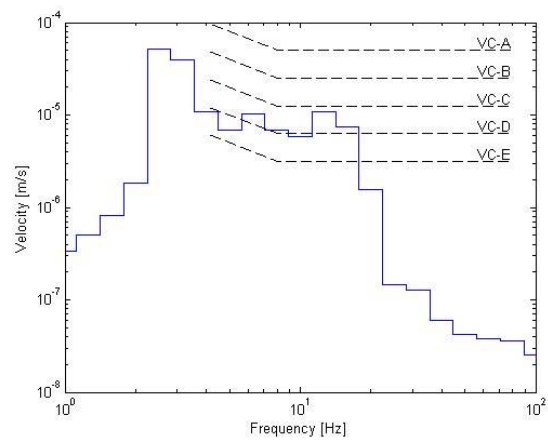
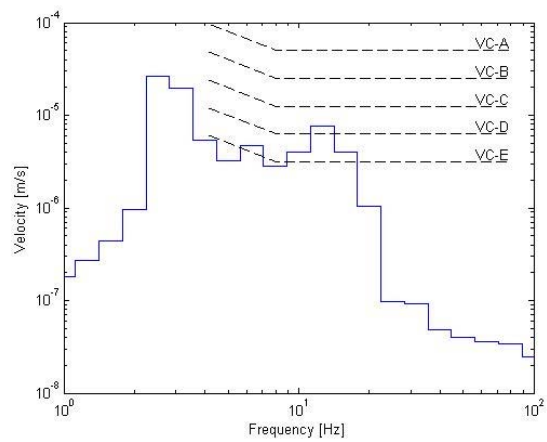
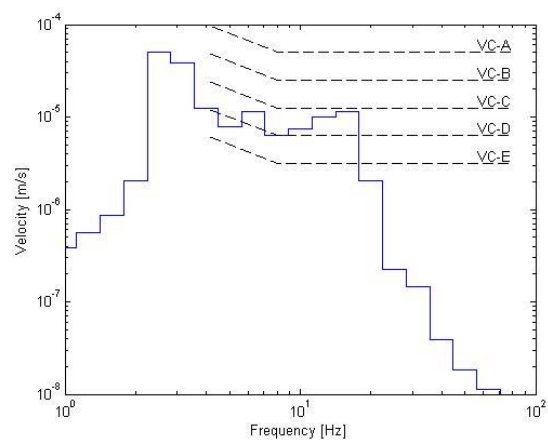
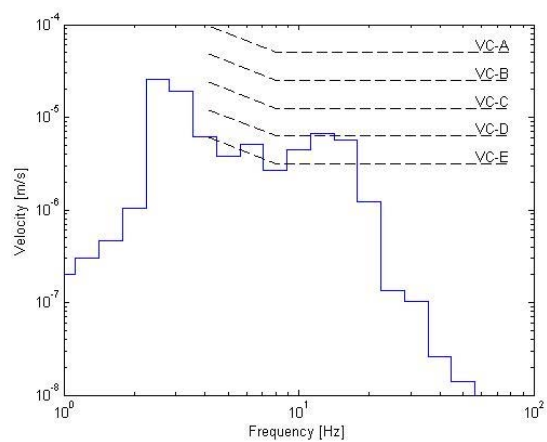


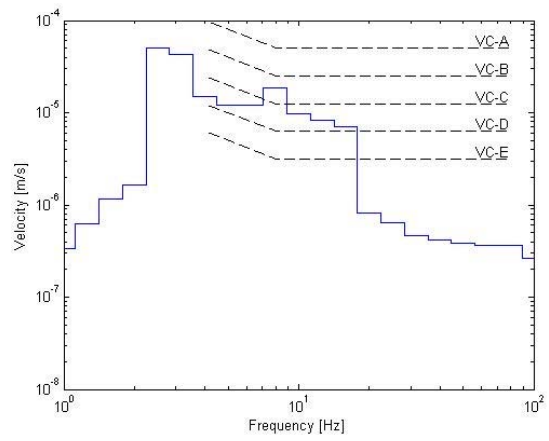
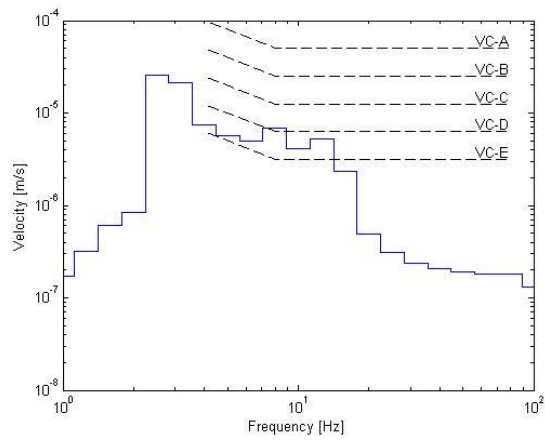
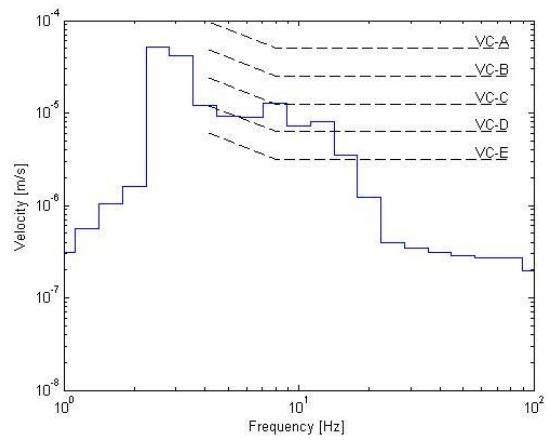
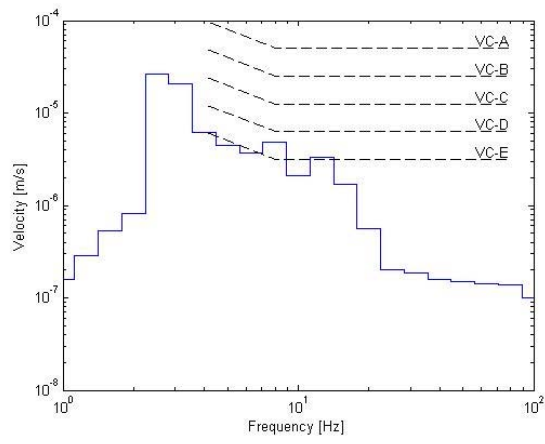
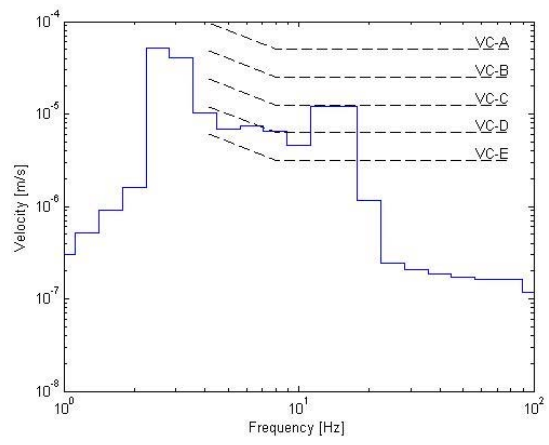
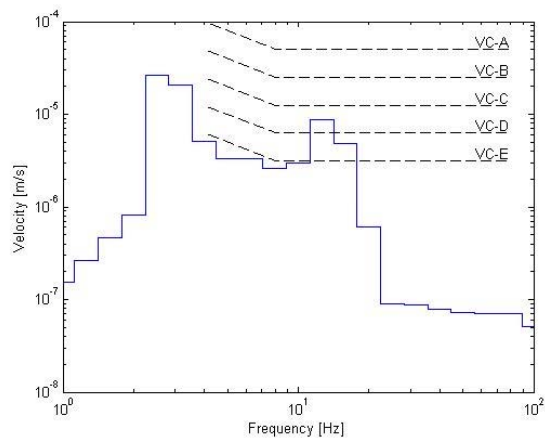


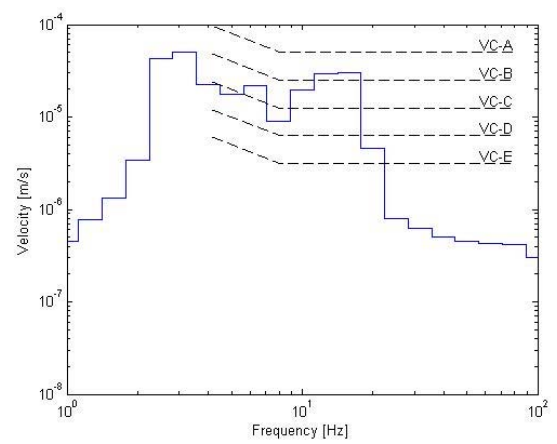
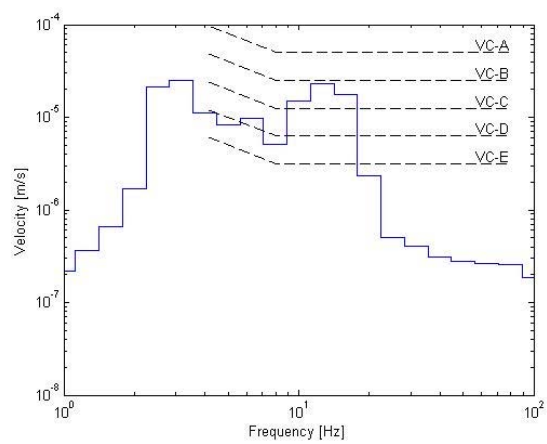
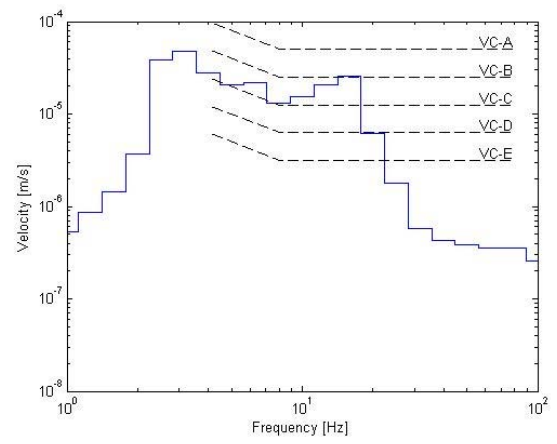
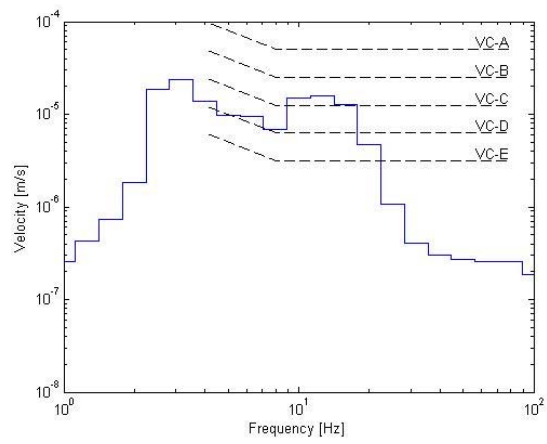
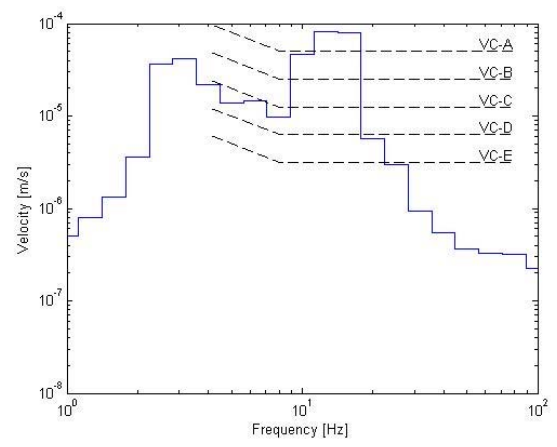
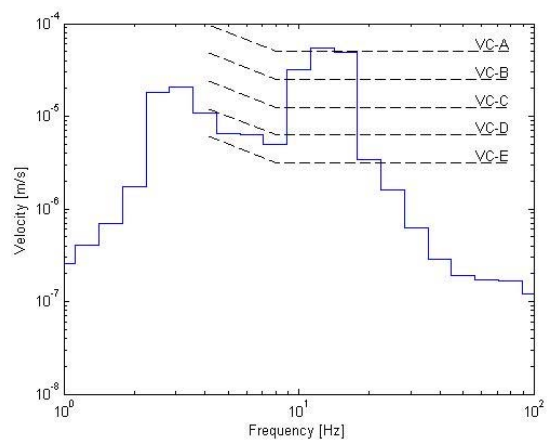


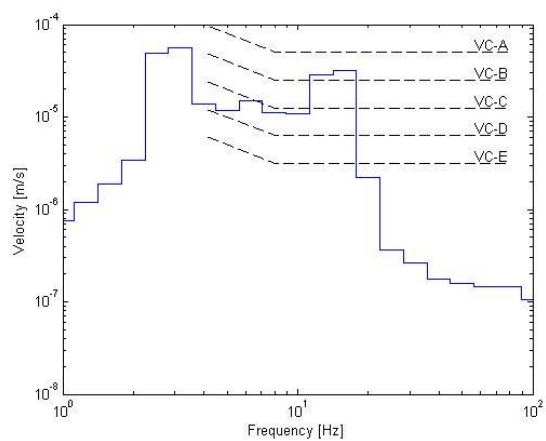
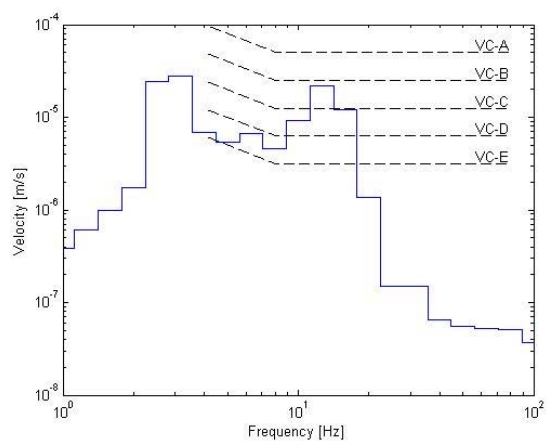
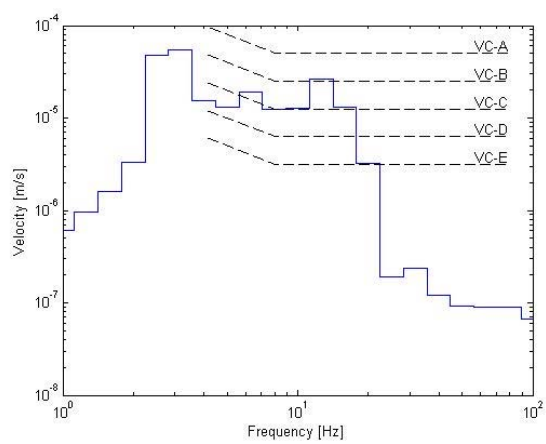
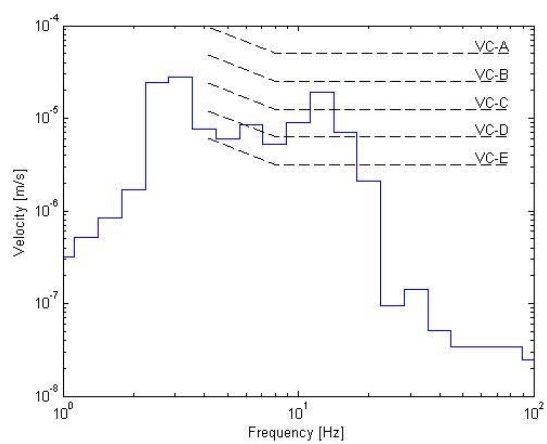
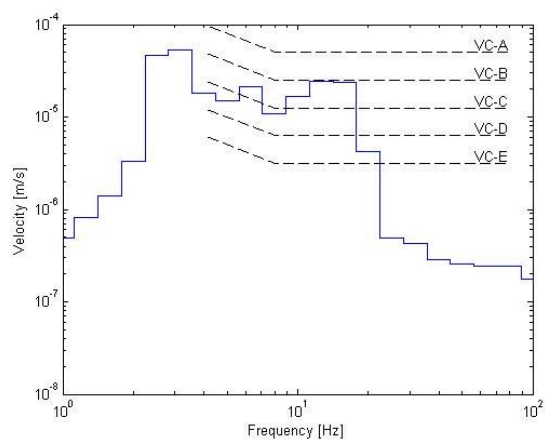
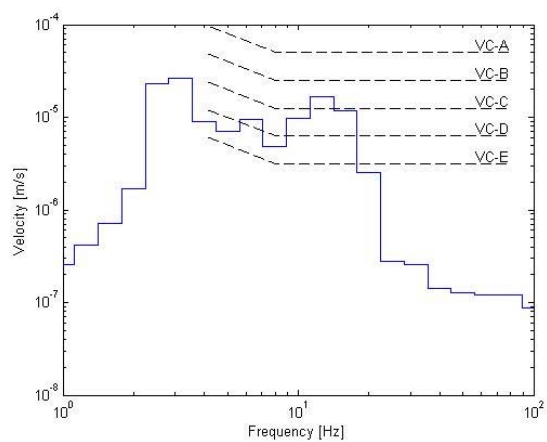


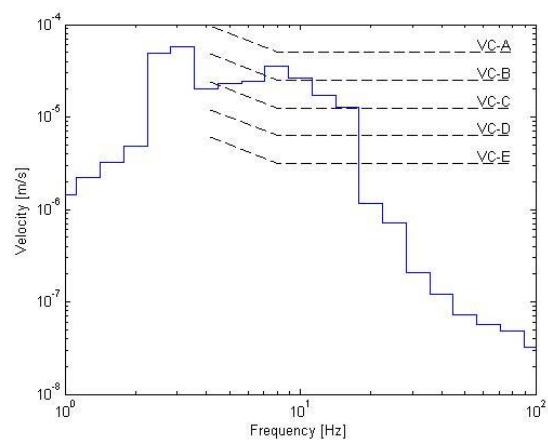
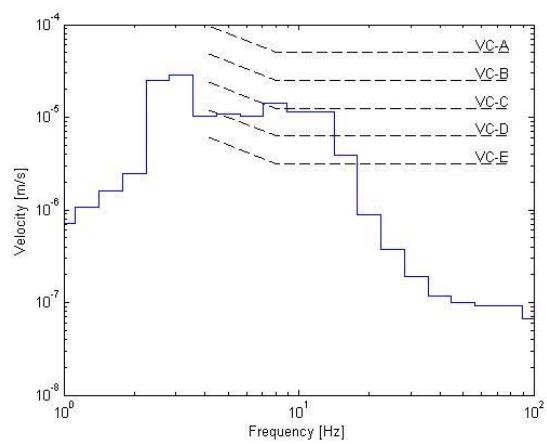
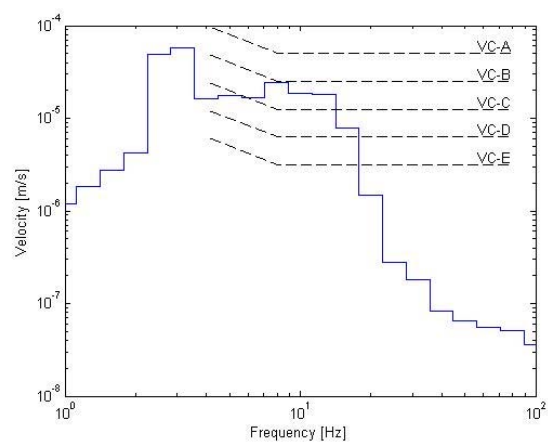
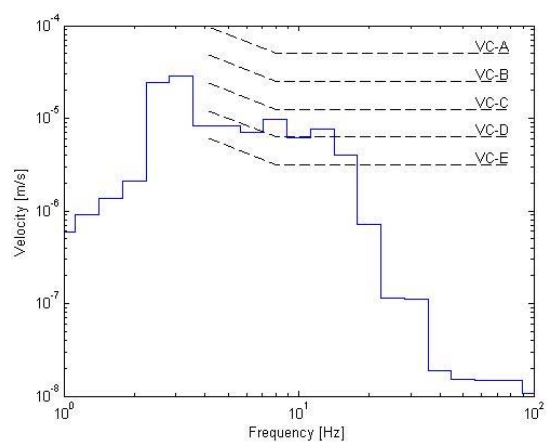
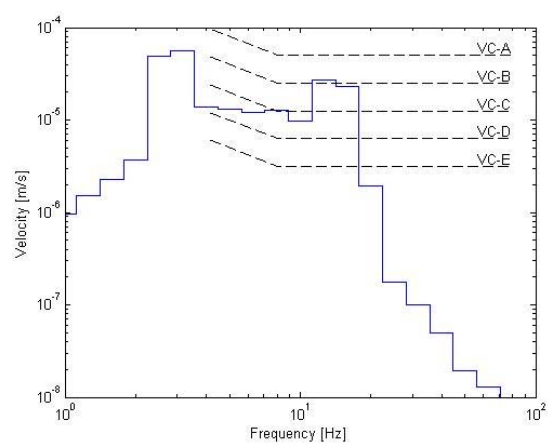
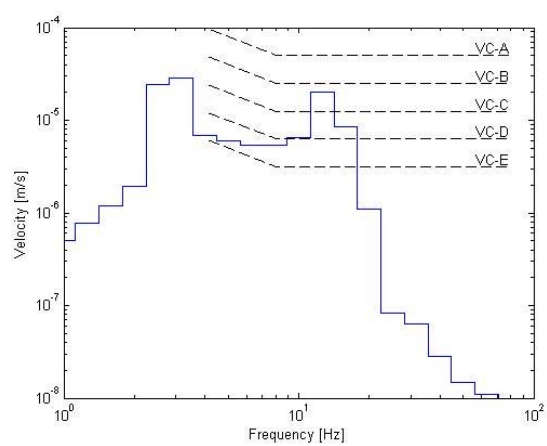












ANEXO A4

ESQUEMA REPRESENTATIVO DO MODELO ADOPTADO

