

COMPORTAMENTO DINÂMICO DE ATRAVESSAMENTOS INFERIORES PRÉ-FABRICADOS EM LINHAS DE ALTA VELOCIDADE

CARLOS HENRIQUE ESTEVES VAZ DA COSTA

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

Orientador: Professor Doutor Rui Artur Bártolo Calçada

Co-Orientador: Professor Doutor Raimundo Moreno Delgado

JULHO DE 2011

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011

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 - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010*.

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.

Aos meus Pais e Irmão

Deve-se dar maior importância às derrotas, porque são elas e não as vitórias que nos tornam conscientes da necessidade de melhorar.

Karl Terzaghi

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho significa o terminar uma fase que foi conseguida com a ajuda directa e indirecta de muitas pessoas, por isso gostaria de expressar os meus profundos agradecimentos de uma forma simples a todas elas.

Em primeiro lugar agradeço ao Prof. Rui Calçada por todo o apoio prestado no desenvolvimento deste trabalho, pela sua paciência, dedicação, motivação, e acima de tudo pela sua exigência perante o mesmo. Ao Pedro Montenegro pelas inúmeras horas “perdidas”, o incansável apoio, e boa disposição perante as dúvidas mais insólitas. Nunca esquecendo o apoio que implicitamente ambos me deram nos momentos de maior desalento. Ao João Rocha pelo tempo despendido no primeiro contacto com o programa ANSYS®, e pelas aplicações que me forneceu que tão importantes foram na evolução deste trabalho.

Queria também dar uma palavra muito especial a todos os amigos que fiz durante a minha vida académica, pois estiveram sempre presentes nos momentos mais importantes. Dando sempre uma palavra de incentivo nas situações mais difíceis, tanto a nível académico como pessoal. A todos os momentos que passamos juntos, onde acabei por perceber realmente que estes amigos não são de agora mas para sempre pelo companheirismo demonstrado e solidariedade. Um agradecimento especial ao Bruno Oliveira pelas muitas horas de trabalho partilhadas nestes últimos tempos na faculdade, pelos conselhos e opiniões dadas. Sem nunca esquecer a verdadeira “família” de geotecnia, que me proporcionou um último ano fantástico.

À Vânia, pela paciência, força, e pela compreensão que demonstrou durante todo o tempo em que desenvolvi este trabalho. E por fim aos meus pais e irmão, por tudo aquilo que significam na minha vida e pela forma como sempre me apoiaram.

RESUMO

Este trabalho tem como principal objectivo estudar os efeitos dinâmicos provocados nas passagens inferiores pré-fabricadas a linhas de alta velocidade, pelos comboios do modelo de carga HSLM-A (EN1991-2, 2003).

O trabalho teve como base um trabalho anterior desenvolvido por Nóbrega (2010). Inicialmente começou-se por desenvolver um modelo de elementos finitos a duas dimensões com recurso ao programa de cálculo ANSYS[®], utilizando as soluções de transição propostas pela ADIF.

Na primeira modelação foram utilizados elementos de estado plano de tensão para modelar a estrutura, constatando-se que este não era viável por diversas razões, como o tempo despendido para cada análise bem como pela facilidade de obtenção das respostas dinâmicas da estrutura. Chegado a esta conclusão foram feitas diversas alterações ao modelo inicial, como a utilização de elementos de viga para a modelação da estrutura e de uma malha menos refinada em todo o modelo, por forma a minimizar os tempos de cálculo e a facilitar a obtenção da resposta dinâmica da estrutura. Foi realizado também um estudo de sensibilidade no que diz respeito ao incremento de tempo a utilizar nas diversas análises, de modo a diminuir ainda mais o tempo de cálculo despendido.

Concluído o modelo foram efectuadas diversas análises para todos os modelos de carga dinâmicos (HSLM-A) descritos na norma EN 1991-2, (2003), para velocidades dos 200 aos 420 km/h com incrementos de 20 km/h. Feitas as análises foram retiradas as respostas dinâmicas da estrutura em diversas secções, escolhidas por serem geralmente as mais críticas do ponto de vista estrutural. As grandezas estudadas são os deslocamentos, acelerações, momentos flectores e esforços transversos. Estas são comparadas entre secções e entre comboios, concluindo assim qual a grandeza das respostas dinâmicas bem como os modelos e velocidades mais desfavoráveis para a estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Alta velocidade, Passagens inferiores, Box culvert, Pré-fabricação, Análise dinâmica.

ABSTRACT

The present work aims to study the dynamic effects caused into prefabricated underpasses to high-speed lines, by the train load model HSLM-A (EN 1991-2, 2003).

This study was based on an earlier work by Nóbrega (2010). Initially, and using ANSYS calculation program, it was developed a finite element model in two dimensions by using the interim solutions from ADIF.

In the first modeling were used elements in the plane-stress to model the structure, noting that it was not feasible for several reasons, such as the time taken for each analysis as well as the ease of obtaining the dynamic responses of the structure. Reaching to this conclusion, were made some changes to the initial model, like using beam elements to modeling the structure and also a less refined mesh in all model, in order to minimize the calculation time and to facilitate the acquisition of the dynamic response. It was also carried out a sensibility study to the time increment to be used in the several analyses in order to further reduce the time spent on calculation.

Completed the modeling, were carried out several tests for all dynamic load models (HSLM-A), described in EN 1991-2, (2003), for speeds from 200 to 420 km/h with increments of 20km/h. Finished the tests, the dynamic responses were taken in several sections of the structure, chosen because they were usually the most critical from the structural standpoint. Several quantities were studied here, such as displacements, accelerations, bending moments and shear forces and were compared between sections and trains, leading to the quantity of the dynamic responses as well as models and speeds more unfavorable to the structure.

KEYWORDS: high-speed, underpasses, box-culvert, prefabrication, dynamic analysis.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. HISTÓRIA E DESENVOLVIMENTO DOS CAMINHOS-DE-FERRO	1
1.2. OBJECTIVOS DA TESE	2
1.3. ORGANIZAÇÃO EM CAPÍTULOS	3
2. ESTRUTURA DE UMA VIA-FÉRREA BALASTRADA E SEU FUNCIONAMENTO	5
2.1. ESTRUTURA DE UMA VIA-FÉRREA BALASTRADA	5
2.2. ELEMENTOS CONSTITUINTES DA SUPERESTRUTURA	6
2.2.1. CARRIS	6
2.2.2. ELEMENTOS DE LIGAÇÃO CARRIL/TRAVESSA	6
2.2.2.1. MATERIAL RESILIENTE NA LIGAÇÃO TRAVESSA/CARRIL	7
2.2.3. TRAVESSAS	7
2.2.3.1. TRAVESSAS BI-BLOCO E MONOBLOCO	8
2.3. ELEMENTOS CONSTITUINTES DA SUBESTRUTURA	9
2.3.1. BALASTRO	9
2.3.2. SUB-BALASTRO	10
2.3.3. FUNDAÇÃO DA VIA	10
3. PASSAGENS INFERIORES PRÉ-FABRICADAS E SEU FUNCIONAMENTO	13
3.1. INTRODUÇÃO	13
3.2. TIPOLOGIA DE BOX CULVERTS PRÉ-FABRICADAS	14
3.3. PROCESSO CONSTRUTIVO DE BOX CULVERTS PRÉ-FABRICADAS	16
3.4. ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE BOX CULVERTS	18
3.4.1. MÉTODOS DE ANÁLISE	18
3.4.1.1. MÉTODOS SIMPLIFICADOS	19
3.4.2. COMPORTAMENTOS DINÂMICOS DE BOX CULVERTS	22
3.4.2.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	23

4. ZONAS DE TRANSIÇÃO EM VIAS DE ALTA VELOCIDADE: NORMAS E PRINCIPAIS PROBLEMAS 29

4.1. INTRODUÇÃO	29
4.2. PROBLEMAS RELATIVOS À VIA	29
4.2.1. DEFEITOS DE GEOMETRIA NA VIA-FÉRREA	31
4.2.2. EFEITO DAS TRAVESSAS FLUTUANTES	31
4.2.3. DIMINUIÇÃO DA RESISTÊNCIA LATERAL DA VIA	31
4.2.4. FACTORES QUE INFLUENCIAM O APARECIMENTO DE DEFEITOS NA GEOMETRIA DA VIA	32
4.3. PROBLEMAS RELATIVOS À GEOTECNIA	33
4.3.1. ASSENTAMENTOS.....	34
4.3.2. ASSENTAMENTOS DEVIDO À DEGRADAÇÃO DO BALASTRO	35
4.3.3. DESLIZAMENTO DAS CAMADAS DE ATERRO E DO BALASTRO	35
4.3.4. COLAPSO DAS SUBCAMADAS DA VIA.....	35
4.4. NORMAS E RECOMENDAÇÕES RELATIVAS À GEOTECNIA	36
4.4.1. ASPECTOS RELATIVOS À CONSTRUÇÃO E À GEOMETRIA DOS ATERROS.....	36
4.4.2. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS.....	37
4.4.3. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS A UTILIZAR NA CONSTRUÇÃO DO ATERRO	37
4.4.4. LIMITAÇÃO DOS ASSENTAMENTOS	38
4.5. SOLUÇÃO A ADOPTAR EM ZONAS DE TRANSIÇÃO	38
4.5.1. CUNHAS DE TRANSIÇÃO.....	38
4.5.1.1. CUNHAS DE TRANSIÇÃO UTILIZADAS PELA ADIF.....	39
4.5.1.2. CUNHAS DE TRANSIÇÃO UTILIZADAS PELA SNCF.....	41
4.5.2. OUTRAS SOLUÇÕES	43
4.5.2.1. RECURSO A MATERIAIS RESILIENTES	43
4.5.2.2. MELHORAMENTO DAS TRAVESSAS EM VIA BALASTRADA.....	44
4.5.2.3. AUMENTO DE RIGIDEZ DA VIA.....	45

5. MODELAÇÃO DA ESTRUTURA E ATERROS ADJACENTES 47

5.1. INTRODUÇÃO	47
5.2. ANÁLISE DINÂMICA E MODELOS DE CARGA UTILIZADOS - NORMA EN 1991-2, (2003)	47
5.2.1. COMBOIOS COMERCIAIS	49
5.2.2. MODELOS DE CARGA DINÂMICOS	50
5.3. Análise dinâmica sem interacção veículo - estrutura.....	53
5.3.1. EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO DINÂMICO.....	53
5.3.2. MODELO COM CARGAS MÓVEIS	56
5.3.3. RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO DINÂMICO.....	57
5.3.3.1. ANÁLISE MODAL.....	57
5.3.3.2. MÉTODO DE NEWMARK.....	58
5.3.4. MODELAÇÃO DA VIA	59
5.3.4.1. MODELAÇÃO DA SUPERESTRUTURA E SUBESTRUTURA	59
5.3.4.2. MODELAÇÃO DA BOX CULVERT	62
5.3.4.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO PLANO 2D	63
5.3.4.4. CONDIÇÕES FRONTEIRA DO MODELO	64
5.3.4.5. AMORTECIMENTO DE RAYLEIGH.....	66

5.3.4.6. ALTERAÇÕES NO MODELO (I)	67
5.3.4.7. ALTERAÇÕES NO MODELO (II)	69
5.3.4.8. MODELO FINAL ADOPTADO (IV)	70

6. ANÁLISE DINÂMICA.....77

6.1. ANÁLISE COMPARATIVA INICIAL.....	77
6.1.1. COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO I E O MODELO II	78
6.1.2. COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO II E O MODELO III	79
6.1.3. COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO III E O MODELO IV	81
6.2. ANÁLISE DINÂMICA	82
6.2.1. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	83
6.2.2. ANÁLISE DINÂMICA DO MODELO FINAL	86
6.2.2.1. DESLOCAMENTOS NA BOX CULVERT	86
6.2.2.2. ACELERAÇÕES NA BOX CULVERT	89
6.2.2.3. MOMENTOS FLECTORES NA BOX CULVERT	92
6.2.2.4. ESFORÇOS TRANSVERSOS NA BOX CULVERT	95

7. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 99

7.1. CONCLUSÕES GERAIS	99
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	100

BIBLIOGRAFIA.....101

ANEXO A1 COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO I E II (SECÇÕES A; B; C; F; G; H).....	105
ANEXO A2 COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO II E III (SECÇÕES A; B; C; D; E; F; G; H)	107
ANEXO A3 COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO III E IV (SECÇÕES A; B; C; F; G; H)....	109
ANEXO A4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE (SECÇÕES A; B; C; D; E; F; G; H).....	111
ANEXO A5 DESLOCAMENTOS NAS SECÇÕES (A; B; C; D; E; F; G; H)	117
ANEXO A6 ACELERAÇÕES NAS SECÇÕES (A; B; C; D; E; F; G; H)	133
ANEXO A7 MOMENTOS FLECTORES NAS SECÇÕES (A; B; C; D; E; F; G; H)	149
ANEXO A8 ESFORÇOS TRANSVERSOS NAS SECÇÕES (A; B; C; D; E; F; G; H).....	165
ANEXO A9 COMPARAÇÃO DAS RESPOSTAS DINÂMICAS DE CADA SECÇÃO PARA	181
TODOS OS COMBOIOS	181
A9.1. Deslocamentos	181
A9.2. Acelerações	184
A9.3. Momentos flectores	187
A9.4. Esforços transversos	192

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Locomotiva Blucher (CP, 2011)	1
Fig. 2 – Futura rede de alta velocidade portuguesa (adaptado de (RAVE, 2010)).....	2
Fig. 3 – Esquema estrutural de uma via balastrada – Perfil longitudinal (Fortunato, 2005)	5
Fig. 4 – Carril UIC 60 (ThyssenKrupp, 2011)	6
Fig. 5 – Elementos de fixação elástica – Sistema 300 (Vossloh, 2011)	7
Fig. 6 – Esquema de montagem de elementos de fixação elástica, onde se podem evidenciar todos os seus componentes, salientado a palmilha (A) (adaptado de (Suyu, 2011))	7
Fig. 7 – Travessa bi-bloco (Sateba, 2011)	9
Fig. 8 – Travessa monobloco (Sateba, 2011)	9
Fig. 9 – Perfil tipo de uma via balastrada	10
Fig. 10 – Passagem inferior pré-fabricada (HANSON, 2011)	13
Fig. 11 – Exemplo do transporte de passagens inferiores do tipo box-culvert (Rocla, 2011)	14
Fig. 12 – Configurações possíveis para a box culvert	15
Fig. 13 – Box culvert flexível	16
Fig. 14 – Diagrama de pressões sobre a travessa superior para os dois tipos de box culvert (adaptado de (Plumey, 2007))	16
Fig. 15 – Molde de pré-fabricação (Engenhariacivil.com, 2011).....	17
Fig. 16 – Exemplo de colocação em obra de box-culverts (Engenhariacivil.com, 2011)	17
Fig. 17 – a) Exemplo do encaixe entre as peças em U b) Exemplo de juntas horizontais e verticais entre módulos.....	18
Fig. 18 - Redistribuição de cargas na box culvert a) Box culvert rígido b) Box culvert flexível (adaptado de (Sang, 2000)).....	19
Fig. 19 – Modelo de análise simplificado para o dimensionamento de box culverts (adaptado de (Sang, 2000)).....	20
Fig. 20 – Simplificações do modelo inicial (Fig. 19) tirando partido da sua simetria (adaptado de (Sang, 2000)).....	21
Fig. 21 – Consideração do modelo da box culvert como um pórtico com apoios elásticos (adaptado de (Sang, 2000)).....	21
Fig. 22 – Modelação da estrutura do box culvert como um pórtico suportado por apoios elásticos, com a acção sobre a travessa superior igual ao peso da coluna de aterro agravada por um factor k (adaptado de (Sang, 2000))	22
Fig. 23 – Esquematisação dos parâmetros abordados no estudo em causa.....	23
Fig. 24 – Variação da rigidez da via para três estruturas distintas	24
Fig. 25 – Variação da rigidez da via para diferentes alturas da camada de recobrimento	24
Fig. 26 – Modelo de cálculo dinâmico	25
Fig. 27 – Lei de variação da rigidez (N/m)	25
Fig. 28 – Evolução da aceleração vertical (m/s ²) durante a passagem das massas não suspensas e semi-suspensas para uma estrutura de secção 2,5x2,5 m fundada num solo indeformável, com uma altura acima da estrutura de 1 m.....	25
Fig. 29 – Acelerações verticais obtidas para a passagem das cargas, com um assentamento diferencial de 3 mm no terraplino de acesso à estrutura de 2,5x2,5 m	26
Fig. 30 – Aumento das tensões em função da distância à estrutura.....	26
Fig. 31 – Evolução dos incrementos de tensão para cada altura de aterro, fixando os módulos de deformabilidade da fundação, a) fundação rígida b) fundação semi-rígida c) fundação flexível	27
Fig. 32 – Tensões devido às forças verticais numa via-férrea balastrada (Fortunato, 2005).....	30

Fig. 33 – Fenómeno de “Bump” nas zonas de transição (adaptado de (ERRI, 1999))	30
Fig. 34 – Exemplo do fenómeno de encurvadura dos carris (<i>jornal oexpresso</i> , 2011)	32
Fig. 35 – Forma típica da encurvadura dos carris e direcção dos esforços gerados (Esveld, 2001) ...	32
Fig. 36 – Via-férrea não balastrada da linha de alta velocidade Chinesa (<i>Jornal do Comércio</i> , 2011)	33
Fig. 37 – Exemplo de falhas no sistema de drenagem de uma via-férrea (<i>webtranspo</i> , 2009)	34
Fig. 38 – Esquema de deslize das camadas constituintes da via-férrea (ERRI, 1999)	35
Fig. 39 – Desenvolvimento da rotura por corte progressivo na fundação (Fortunato, 2006)	36
Fig. 40 – Perfil tipo de um aterro recentemente construído numa zona de transição (ERRI, 1999)	36
Fig. 41 – Perfil tipo de um aterro numa zona de transição de uma via-férrea mais antiquada (ERRI, 1999)	37
Fig. 42 – Pormenor da solução de transição para $H=0$ m (adaptado de (ADIF, 2006))	39
Fig. 43 – Cunhas de transição utilizadas pela ADIF para o caso I, com alturas de recobrimento variáveis: a) $H > 2$ m b) $0,5 < H < 2$ m c) $0 < H < 0,5$ m d) $H=0$ m (adaptado de (ADIF, 2006))	40
Fig. 44 – Esquema de transição entre o aterro e a estrutura para uma altura de recobrimento entre 0,10 e 0,30 m e entre 0,30 e 0,70, com H variável: a) $H \geq 4$ m b) $3 < H < 4$ m c) $H < 3$ m (adaptado de (SNCF, 2002))	42
Fig. 45 – Esquema de transição entre o aterro e a estrutura: a) $0,70 < E_R < 1,20$ m b) $E_R > 2$ m (adaptado de (SNCF, 2002))	43
Fig. 46 – Elementos resilientes que se podem aplicar na via-férrea (adaptado de (Leykauf, 2006)) ..	43
Fig. 47 – Reforço de travessas (Couto, 2008)	44
Fig. 48 – Estruturas “Frame sleeper” (Couto, 2008)	45
Fig. 49 – Variação de rigidez vertical na zona de transição (Coelho, 2008)	45
Fig. 50 – Travessas de aproximação (Nóbrega, 2010)	46
Fig. 51 – Carris extra ao longo da zona de transição (Nóbrega, 2010)	46
Fig. 52 – Fluxograma de apoio à decisão de realização de uma análise dinâmica de uma estrutura (adaptado de (EN1991-2, 2003))	48
Fig. 53 – Modelo de comboio articulado (EN1991-2, 2003)	49
Fig. 54 – Modelo de comboio convencional (EN1991-2, 2003)	49
Fig. 55 – Modelo de comboio regular (EN1991-2, 2003)	50
Fig. 56 – Modelos de alguns comboios comerciais: a) TGV – atlantique (<i>FreeFoto.com</i> , 2011) b) ICE – 2 (<i>Wordpress</i> , 2011) c) Talgo – 350 (<i>Wikipédia</i> , 2011)	50
Fig. 57 – Configuração genérica do modelo de carga HSLM-A (EN1991-2, 2003)	51
Fig. 58 – Configuração genérica do modelo HSLM-B (EN1991-2, 2003)	51
Fig. 59 – Diagrama de parâmetros do modelo HSLM-B (EN1991-2, 2003)	52
Fig. 60 – Exemplo da relação entre o coeficiente de amortecimento e a frequência	55
Fig. 61 – Esquema da variação da força nodal no nó i devido à passagem de uma carga móvel P_k (Ribeiro, 2004)	57
Fig. 62 – Modelação adoptada das travessas (adaptado de (Nóbrega, 2010))	60
Fig. 63 – Pormenor da descretização adoptada nas camadas de balastro, sub-balastro e camada de forma (Nóbrega, 2010)	61
Fig. 64 – Pormenor da descretização adoptada nas cunhas de material tratado, granular, aterro e fundação (adaptado de (Nóbrega, 2010))	61
Fig. 65 – Descretização utilizada na box culvert (modelo I)	63
Fig. 66 – Variação da espessura em função do módulo de deformabilidade para $H_{solo}=12$ m (adaptado de (Ferreira, 2009))	64
Fig. 67 – Condições de apoio do solo de fundação (adaptado de (Nóbrega, 2010))	64
Fig. 68 – Representação de amortecedores viscosos na camada de balastro (Nóbrega, 2010)	65

Fig. 69 – Modos de vibração natural do modelo I	66
Fig. 70 – Descritização utilizada na box culvert (modelo II)	67
Fig. 71 - Modos de vibração natural do modelo II.....	68
Fig. 72 – a) Exemplo da box culvert utilizada na modelação (adaptado de (FARCIMAR, 2011)) b) Localização das rótulas no modelo	69
Fig. 73 - Modos de vibração natural do modelo III.....	70
Fig. 74 – a) Modelo da ADIF com os estratos inclinados b) Modelo utilizado por simplificação do modelo (a) c) Alturas dos vários patamares e da fundação	71
Fig. 75 – a) Exemplo da modelação das palmilhas e das travessas b) Dimensões da travessa	72
Fig. 76 – Pormenor de descritização utilizada no balastro, sub-balastro e camada de forma.....	73
Fig. 77– Pormenor da descritização utilizada no material tratado, material granular, aterro e fundação	73
Fig. 78 – Descritização utilizada na box culvert (modelo IV)	74
Fig. 79 – Modos de vibração natural do modelo IV.....	75
Fig. 80 – Aspecto final da discretização do modelo IV	75
Fig. 81 - Esquema da box-culvert utilizada neste trabalho e referência às secções utilizadas na análise comparativa	78
Fig. 82 - Comparação de resultados entre o modelo I e II a) Deslocamentos b) Acelerações	79
Fig. 83 - Comparação de resultados entre o modelo II e III a) Deslocamentos b) Acelerações c) Momentos flectores d) Esforços transversos	80
Fig. 84 – Comparação de resultados entre o modelo III e IV a) Deslocamentos b) Acelerações c) Momentos flectores d) Esforços transversos	82
Fig. 85 – Esquema de pontos onde foram retirados os deslocamentos, acelerações, momentos e esforços transversos	83
Fig. 86 – Resultados no ponto B para os diferentes steps a) Deslocamentos b) Acelerações c) Momentos flectores d) Esforços transversos	85
Fig. 87 – Comparação de deslocamentos entre modelos de carga para a secção A (a)) e para a secção H (b)).....	86
Fig. 88 – Deslocamentos máximos positivos e negativos para cada secção a analisar a) Deslocamentos verticais b) Deslocamentos horizontais.....	87
Fig. 89 – Deslocamentos máximos positivos e negativos para cada secção a analisar a) Deslocamento vertical b) Deslocamento horizontal	88
Fig. 90 – Deslocamento na secção A para a velocidade de 200, 320 e 420 km/h.....	89
Fig. 91 - Comparação de acelerações entre modelos de carga para a secção A (a)) e para a secção H (b))	90
Fig. 92 – Acelerações máximas positivas e negativas para cada secção a analisar a) Acelerações verticais b) Acelerações horizontais.....	91
Fig. 93 – Acelerações máximas positivas e negativas nas secções a analisar a) Acelerações verticais b) Acelerações horizontais	91
Fig. 94 – Aceleração para diferentes velocidades na secção A, para o modelo de carga HSLM-A10	92
Fig. 95 - Comparação de momentos entre modelos de carga para a secção A (a)) e para a secção H (b))	93
Fig. 96 – Momentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar a) HSLM-A9 b) HSLM-A10	94
Fig. 97 – Momentos para diferentes velocidades na secção A, para o modelo de carga HSLM-A10 (a) e b))	95

Fig. 98 - Comparação dos esforços transversos entre modelos de carga para a secção A (a)) e para a secção H (b)).....	96
Fig. 99 – Esforço transverso máximo positivo e negativo para cada uma das secções a analisar a) Esf. transversal vertical b) Esf. transversal horizontal.....	97
Fig. 100 – Esforço transverso máximo positivo e negativo para cada secção a analisar a) Esf. transversal vertical b) Esf. transversal horizontal.....	97
Fig. 101 – Esforços transversos para diferentes velocidades na secção A, para o modelo de carga HSLM-A10.....	98

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Valores da análise paramétrica.....	23
Quadro 2 – Características do caso I em função das alturas de recobrimento	39
Quadro 3 – Características das diversas zonas de transição adoptadas pela (SNCF, 2002)	41
Quadro 4 – Características das diferentes classes (EN1991-2, 2003).....	49
Quadro 5 – Características do esquema de carga HSLM-A (EN1991-2, 2003).....	51
Quadro 6 – Condições de aplicação dos modelos HSLM (EN1991-2, 2003).....	52
Quadro 7 – Amortecimento estrutural para o cálculo dinâmico (EN1991-2, 2003)	56
Quadro 8 – Características de cada elemento utilizado na modelação	62
Quadro 9 – Características utilizadas na modelação da box culvert	63
Quadro 10 – Cálculo do amortecimento visto das fronteiras laterais	65
Quadro 11 – Constantes de amortecimento de Rayleigh	67
Quadro 12 – Especificação das opções tomadas na modelação do carril e das palmilhas	72
Quadro 13 – Modelos utilizados na análise comparativa	77
Quadro 14 – Comparação de resultados na secção B para vários incrementos de tempo	85

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ADIF – Administrador de Infra-estruturas Ferroviárias

CIARI – Centro de Investigação e Análise em Relações Internacionais

CP – Comboios de Portugal

SNCF – Sociedade Nacional de Caminhos de Ferro Franceses

RAVE – Rede Ferroviária de Alta Velocidade

UIC – União Internacional de Caminhos de Ferro

HSLM – “High Speed Load Model”

MG – Material granular (ADIF)

MT – Material tratado (ADIF)

H – Altura de recobrimento sobre a estrutura (ADIF)

B – Balastro (ADIF)

SB – Sub-balastro (ADIF)

C.F. – Camada de forma (ADIF)

G.T. – Material tratado (SNCF)

G.N.T. – Material granular não tratado (SNCF)

H – Altura de aterro (SNCF)

E_R – Altura de recobrimento (SNCF)

R.M.C. – Aterro (SNCF)

δ_{sl} – Deslocamento dos blocos laterais

ΔF – Incrementos de carga sobre a box culvert

l – Comprimento total da estrutura

d – Altura total da estrutura

r – Altura de aterro sobre a estrutura

E_0 – Módulo de elasticidade do aterro

E_b – Módulo de elasticidade da fundação

k_0 – Rigidez de referência

k_{max} – Valor de rigidez máximo

Δk – Variação de rigidez

d_{BS} – Distância entre bogies de duas carruagens sequenciais

d_{BA} – Distância entre eixos do mesmo bogie

- D – Comprimento total de uma carruagem
- P – Força por eixo de cada comboio
- $f_i(t)$ – Forças de inércia
- $f_c(t)$ – Forças de amortecimento
- $f_e(t)$ – Forças elásticas
- $f(t)$ – Vector de forças exterior
- M – Matriz de massa
- C – Matriz de amortecimento
- K – Matriz de rigidez
- $\ddot{u}$ – Vector das acelerações para cada instante de tempo
- $\dot{u}$ – Vector das velocidades para cada instante de tempo
- u – Vector deslocamento para cada instante de tempo
- a_0 e a_1 – Constantes de amortecimento de Rayleigh
- ξ – Coeficiente de amortecimento de Rayleigh
- ω – Frequência angular
- φ – Fase inicial
- $x_k(t)$ – Localização das carga móveis em cada instante de tempo
- $x_k(t_0)$ – Posição inicial da carga móvel
- v – Velocidade
- t – Tempo
- P_i – Força nodal equivalente
- Φ – Modo de vibração
- γ e β – Parâmetros de Newmark
- Δt – Incremento de tempo
- f_{max} – Frequência mais alta de vibração
- L – Vão
- n – Número de modos
- v_{max} – Velocidade máxima do comboio
- E – Modulo de deformabilidade
- ρ – Massa volúmica
- A – Área
- I – Inércia
- K – Rigidez vertical

C - Amortecimento

ν – Coeficiente de Poisson

E_{solo} – Módulo de deformabilidade do solo de fundação

H_{solo} – Altura total do solo de fundação

Cv_n – Coeficiente de amortecimento normal

Cv_t – Coeficiente de amortecimento tangencial

G – Módulo de rigidez elástica

1

INTRODUÇÃO

1.1. HISTÓRIA E DESENVOLVIMENTO DOS CAMINHOS-DE-FERRO

Os caminhos-de-ferro surgiram pela necessidade de transportar cargas pesadas desde a antiguidade. Este conceito baseia-se em deslocar um veículo ou vários que se ligam entre si sobre carris antecipadamente dispostos, segundo uma determinada distância e direcção. A primeira locomotiva foi construída em Inglaterra em 1814 por George Stephenson que lhe deu o nome de Blucher, tendo esta a capacidade de transportar 30 toneladas a 6km/h. A primeira linha férrea foi inaugurada em 1825 entre Stockton e a região mineira de Darling também construída por George Stephenson, com um desenvolvimento total de 61km.



Fig. 1 – Locomotiva Blucher (CP, 2011)

O caminho-de-ferro foi o grande impulsionador na transição de um meio de transporte lento e limitado a carregar minério para passar a ser também de passageiros. O seu desenvolvimento era tal que em 1835, apenas 10 anos após a construção da primeira linha este atingiu os 100km/h, algo que até à data era inatingível. Rapidamente se expandiu pela Europa, mas também pelos vários continentes, realizando-se a primeira viagem em Portugal a 28 de Outubro de 1856 entre Lisboa e o Carregado. Depois deste marco histórico rapidamente se desenvolveram as linhas férreas nacionais, proporcionando estas uma evolução social e económica (CP, 2011).

Com o aparecimento do automóvel e do avião e devido ao seu rápido desenvolvimento na era do petróleo o comboio começou a ficar em desuso, acabando mesmo algumas linhas férreas por fechar. Com a crise do petróleo em meados do século passado, surgem novos investimentos no sector ferroviário centrando-se estes em linhas urbanas de alta velocidade.

Foi no Japão que se desenvolveu o conceito de alta velocidade, devido à necessidade de satisfazer a crescente procura do transporte de passageiros. Devido a tal situação iniciou-se a construção da

primeira linha de alta velocidade em 1958 que liga Tóquio a Osaka com o nome de Tokaido sendo inaugurada em 1964. Esta linha permitia que os primeiros comboios circulassem a velocidades na ordem dos 200km/h, actualmente podem alcançar os 300km/h.

A linha de alta velocidade foi introduzida na europa pela França também pela necessidade de satisfazer o transporte de passageiros entre a cidade de Paris e Lyon. Em 1966 deram início aos estudos sobre a construção da nova linha que viria a ser inaugurada entre 1981 e 1983 (CIARI, 2011).

Em Portugal está prevista a construção de linhas de alta velocidade de maneira a que fique integrado na rede Transeuropeia. Com este projecto pretende-se obter um descongestionamento das principais linhas europeias, de forma a aumentar a competitividade, o desenvolvimento sustentável do sistema portuário, aeroportuário e logístico e principalmente a integração de Portugal no espaço europeu. Estes objectivos já foram comprovados pelo sucesso dos projectos já em serviço. Na figura seguinte pode-se observar a futura rede de alta velocidade portuguesa, tendo em atenção que a ligação Madrid-Lisboa, Lisboa-Porto e Porto-Vigo são consideradas prioritárias. As ligações Aveiro-Salamanca e Évora-Faro/Huelva estão ainda em estudo.

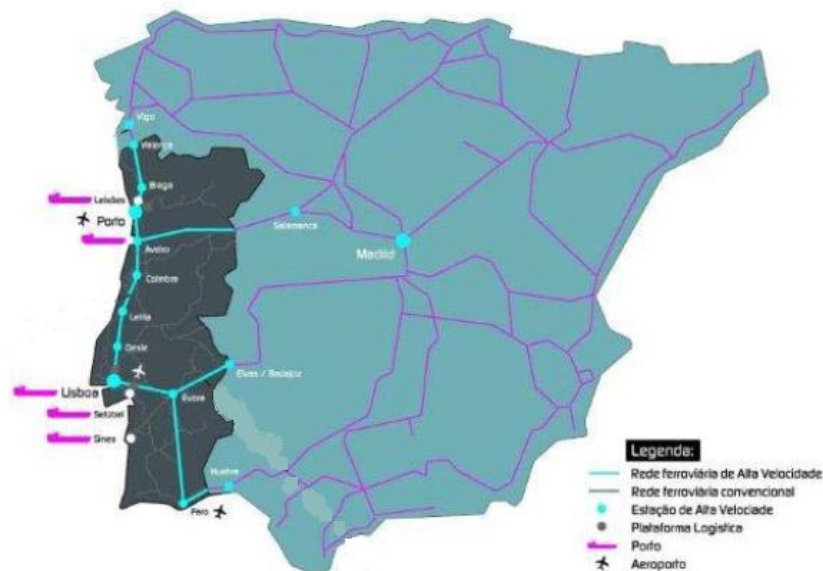


Fig. 2 – Futura rede de alta velocidade portuguesa (adaptado de (RAVE, 2010))

Em toda a Europa estão a ser construídas novas linhas de alta velocidade e desenvolvidos novos projectos. A construção destas linhas com velocidades de circulação cada vez mais elevadas impõe um maior rigor na elaboração dos projectos das mesmas, analisando e avaliando o comportamento dinâmico das estruturas. Tal situação pode por em causa a estabilidade da própria estrutura, como por em risco a segurança dos seus utentes (RAVE, 2010).

1.2. OBJECTIVOS DA TESE

Este trabalho tem como principal objectivo estudar o comportamento dinâmico de um atravessamento inferior pré-fabricado a uma via-férrea balastrada de alta velocidade, quando sujeito à passagem de diversos comboios a várias velocidades, tentando perceber qual o modelo de carga dinâmica mais

gravoso para a estrutura. Tem-se em especial atenção as zonas de transição porque induzem na via uma variação de rigidez, que leva ao aumento dos efeitos dinâmicos na estrutura.

Em função do principal objectivo desenvolveu-se um modelo de elementos finitos a duas dimensões em estado plano de tensão, adoptando as soluções de transição propostas pela ADIF. Este modelo foi desenvolvido com recurso ao programa comercial ANSYS®. Neste estudo pretende-se avaliar o comportamento da estrutura quando sujeita ao carregamento dos modelos de carga dinâmicos HSLM-A propostos na norma EN 1991-2, (2003) a várias velocidades.

1.3. ORGANIZAÇÃO EM CAPÍTULOS

O presente trabalho foi dividido em sete capítulos.

O Capítulo 1 apresenta um enquadramento histórico sobre a evolução dos caminhos-de-ferro a nível nacional e mundial até aos nossos dias. Apresenta também os objectivos deste trabalho bem como a sua estrutura.

No Capítulo 2 é apresentada a estrutura de uma via-férrea balastrada, subdividindo-a em superestrutura e subestrutura. Em cada uma destas subdivisões foram apresentados os seus constituintes, localizando-os na estrutura tipo da via, descrevendo quais os materiais utilizados na sua construção, e suas principais funções.

O Capítulo 3 apresenta como surgiram os atravessamentos inferiores pré-fabricados e as suas principais funções. No desenvolvimento do mesmo é feita uma distinção entre os vários tipos de atravessamentos em função da sua estrutura e tipologia, analisando o seu processo construtivo, desde a pré-fabricação, transporte e colocação em obra. Por fim é feita a apresentação de alguns métodos de dimensionamento simplificados assim como uma abordagem ao seu funcionamento quando sujeito a cargas dinâmicas em função de um estudo desenvolvido no âmbito das linhas férreas de alta velocidade espanholas.

No Capítulo 4 é feita uma abordagem à problemática das zonas de transição nas vias-férreas e à importância da sua variação de rigidez vertical. São apresentados os principais problemas que estas podem induzir por diversos factores, e algumas normas e recomendações relativas à geotecnia a adoptar nestas zonas bem como soluções de transição aterro-estrutura e algumas medidas de prevenção dos problemas que estas podem provocar.

No Capítulo 5 são apresentados os efeitos dinâmicos que os comboios podem provocar numa zona de transição aterro-estrutura, tendo por base a solução da ADIF. Inicialmente são apresentados os modelos de carga dinâmicos propostos na norma EN 1991-2, (2003) e por curiosidade alguns comboios comerciais europeus. São também apresentados os métodos de análise dinâmica em função do tempo considerados para o desenvolvimento deste trabalho, referindo ainda as diversas opções tomadas na modelação da via, assim como as suas alterações até ao modelo de cálculo adoptado.

O Capítulo 6 apresenta os resultados de vários estudos de comparação entre modelos para um dos dez comboios HSLM-A, o comboio A-9. Seguindo-se da apresentação dos deslocamentos, acelerações, momentos flectores e esforços transversos em diversos pontos da box culvert, para os comboios HSLM-A a velocidades dos 200 aos 420 km/h com incrementos de 20 km/h.

No Capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões do presente trabalho e a sugestão de desenvolvimentos futuros.

2

ESTRUTURA DE UMA VIA-FÉRREA BALASTRADA E SEU FUNCIONAMENTO

2.1. ESTRUTURA DE UMA VIA-FÉRREA BALASTRADA

As vias-férreas balastradas praticamente não sofreram alterações na sua constituição ao longo do tempo. Mas com a necessidade de tornar este sistema de transporte mais cómodo e competitivo foram desenvolvidas novas soluções que permitiram resolver problemas da via tradicional balastrada. Estes foram solucionados com a utilização de travessas de betão com grandes superfícies de apoio em detrimento das de madeira, carris mais pesados e com maior inércia à flexão, e optimização dos elementos de fixação carril/travessa.

Esta solução apresenta vantagens relativamente às vias não balastradas, pois tem custos de construção mais reduzidos, facilidade de substituição de componentes da via se necessário, boas condições de drenagem, elasticidade e melhores compromissos entre rigidez e amortecimento. No entanto, todas estas capacidades são condicionadas pela elevada necessidade de manutenção que a linha requer, como reposição de balastro e alinhamento da via (Fortunato, 2005).

Uma via-férrea balastrada divide-se normalmente em superestrutura e subestrutura como está representado na figura seguinte.

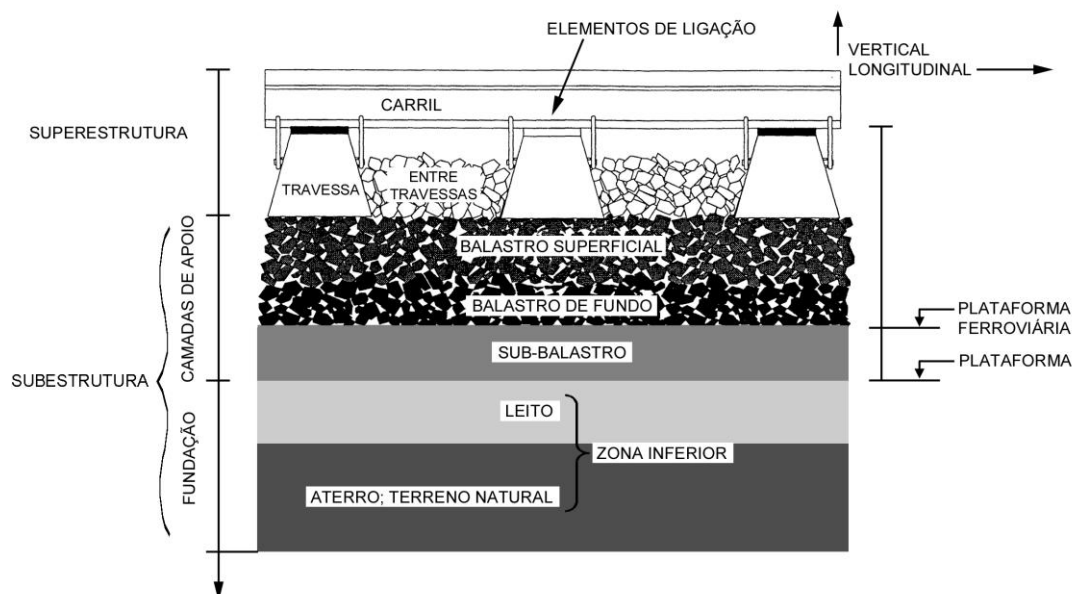


Fig. 3 – Esquema estrutural de uma via balastrada – Perfil longitudinal (Fortunato, 2005)

Por observação da figura anterior podemos concluir que a superestrutura e a subestrutura se podem dividir em diferentes elementos. A superestrutura é constituída pelos carris, pelos elementos de ligação e pelas travessas. A subestrutura é constituída pelo balastro, sub-balastro e pela fundação.

2.2. ELEMENTOS CONSTITUINTES DA SUPERESTRUTURA

2.2.1. CARRIS

São considerados elementos fundamentais nas vias férreas e tem como funções principais, guiar as rodas do veículo ou veículos que sobre eles circulam, conduzir a corrente eléctrica dos sistemas de sinalização e tracção, proporcionar uma superfície de rolamento lisa e resistir a esforços longitudinais, transversais e verticais gerados pelo movimento.

Estes elementos permitem um movimento contínuo dos diversos veículos que sobre eles se deslocam, transferindo as cargas concentradas das rodas para as travessas. Nas linhas de alta velocidade são utilizados perfis com massas muito significativas, de forma a reduzir os custos de manutenção e conservação da via, assim como aumentar a própria durabilidade dos carris e da via. Como exemplos dos tipos de carris utilizados nas vias de alta velocidade temos os UIC 60 com 60kg/m (Fig. 4). Estes carris são menos deformáveis, logo fazem uma distribuição de cargas por um maior número de travessas o que por sua vez reduz a solicitação sobre as camadas de apoio (Fortunato, 2005).

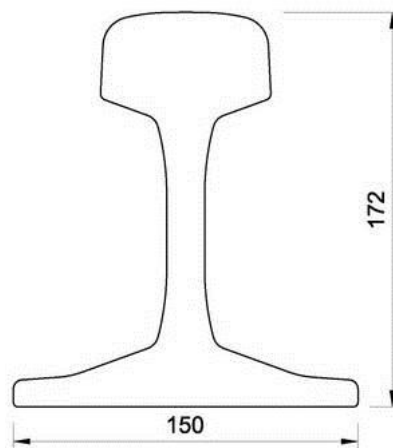


Fig. 4 – Carril UIC 60 (ThyssenKrupp, 2011)

2.2.2. ELEMENTOS DE LIGAÇÃO CARRIL/TRAVESSA

Estes permitem promover a ligação adequada entre a travessa e o carril, de modo a que os esforços originados pelas acções verticais, laterais, de torção e variações de temperatura sejam reduzidos.

Os elementos de ligação podem-se dividir em dois grupos dependendo do tipo de travessa, os rígidos e os elásticos (Fig. 5). Em travessas de madeira devem usar-se apoios metálicos, de forma a proteger a madeira contra o desgaste mecânico e assegurando tensões admissíveis. Nas travessas de betão é necessária a colocação de elementos resilientes, reduzindo a vibração provocada pelas rodas para diminuir o atrito carril travessa, e isolamento eléctrico dos circuitos da via (Fortunato, 2005).



Fig. 5 – Elementos de fixação elástica – Sistema 300 (Vossloh, 2011)

2.2.2.1. MATERIAL RESILIENTE NA LIGAÇÃO TRAVESSA/CARRIL

Este tipo de ligação permite controlar os movimentos ascendentes e descendentes do carril em relação à travessa. São elementos fundamentais para o controlo da rigidez da via, que influenciam a absorção de esforços, logo permitem diminuir os seus custos de manutenção. Na Fig. 6 está representado um tipo de fixação duplamente elástica, onde é perceptível uma palmilha sobre o carril (A). Nesta palmilha destacam-se umas nervuras que tem como principal função impedir que a borracha perca resistência quando comprimida pelo carril com restrição de expansão lateral. Estas nervuras permitem que a palmilha mantenha as suas características elásticas durante mais tempo (Couto, 2008).

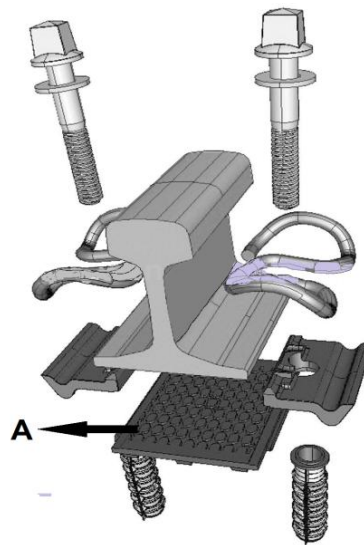


Fig. 6 – Esquema de montagem de elementos de fixação elástica, onde se podem evidenciar todos os seus componentes, salientado a palmilha (A) (adaptado de (Suyu, 2011))

2.2.3. TRAVESSAS

As travessas são elementos que se localizam entre os carris e o balastro. Deste modo estas transmitem as cargas verticais ao balastro provenientes do movimento dos veículos. Caracterizam-se por uma boa resistência mecânica, quer na direcção horizontal quer na vertical, assegurando assim a estabilidade

dos carris, mantendo o afastamento entre eixos e inclinação. Devem ainda assegurar o isolamento eléctrico entre os carris.

Normalmente as travessas são de madeira, aço ou betão armado. A opção por cada um destes materiais prende-se com diversos factores, tal como a durabilidade, resistência, e susceptibilidade a ataques biológicos. As travessas de madeira que ainda hoje são utilizadas, tem algumas desvantagens perante as de betão armado, como um custo elevado, baixa durabilidade e susceptibilidade a ataques biológicos. Mas pelo contrário a baixa rigidez global que as travessas de madeira proporcionam à via, fazem com que as cargas dinâmicas sejam menos gravosas, logo estas são indicadas para vias com plataformas de má qualidade. As travessas em aço rapidamente deixaram de ser utilizadas devido ao facto de necessitarem de um isolamento eléctrico especial, dificuldade de serem posicionadas correctamente na via, pela transmissão de ruído, e porque são muito susceptíveis a ataques químicos. Por fim as travessas de betão, que tem duas configurações possíveis em bi-bloco e monobloco. A utilização de travessas de betão tem-se revelado mais vantajosa, visto que estas conferem uma maior resistência, maior durabilidade, logo menor necessidade de manutenção da via. Mas também apresentam algumas desvantagens, como dificuldades de manuseamento, maior fragilidade, maior dificuldade em manter o nivelamento em plataformas medíocres e preços mais elevados (Fortunato, 2005). Com o passar do tempo as dimensões das travessas tem aumentado, devido ao facto de cada vez mais se quererem aumentar as velocidades nas linhas férreas. Isto para que se diminua a tensão aplicada ao balastro, e se aumente a estabilidade lateral da via. Também é de notar que o espaçamento entre travessas é uma condição importante no desempenho da via, principalmente se a plataforma não for de boa qualidade (Fortunato, 2005 e Alves, 2010).

2.2.3.1. TRAVESSAS BI-BLOCO E MONOBLOCO

As travessas bi-bloco (Fig. 7), são constituídas por dois blocos ligados entre si por um elemento metálico, que garante a bitola pretendida. Este tipo de travessa possibilita economizar betão e reduzir o seu peso total. Apesar disto apresenta algumas limitações como maiores cargas concentradas no balastro uma vez que a superfície de apoio é pequena, e também necessita de acessórios especiais de isolamento eléctrico.

No caso das travessas monobloco (Fig. 8) como o próprio nome indica são apenas constituídas por um bloco de betão. Inicialmente estas eram de betão armado, mas devido a alguns problemas de fendilhação, foi introduzido o pré-esforço, que possibilita um melhor comportamento mecânico da travessa, assim como a redução da sua espessura na zona central.

Perante estas duas soluções podemos concluir que as travessas monobloco tem vantagens relativamente às bi-bloco, como possibilitar uma maior distribuição de cargas, conservam a distância entre eixos dos carris, são mais económicas devido ao pré-esforço, e concedem uma maior estabilidade à via (Couto, 2008).

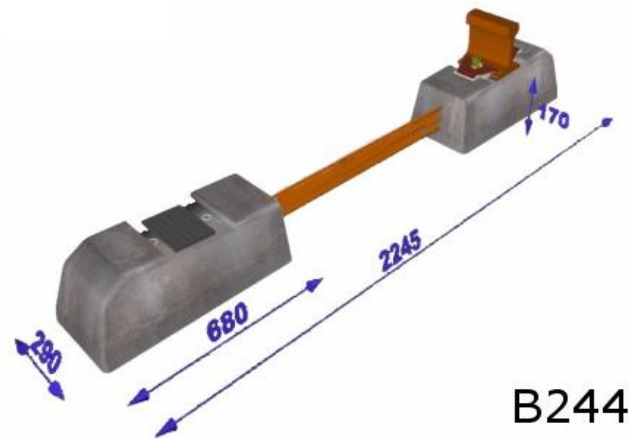


Fig. 7 – Travessa bi-bloco (Sateba, 2011)

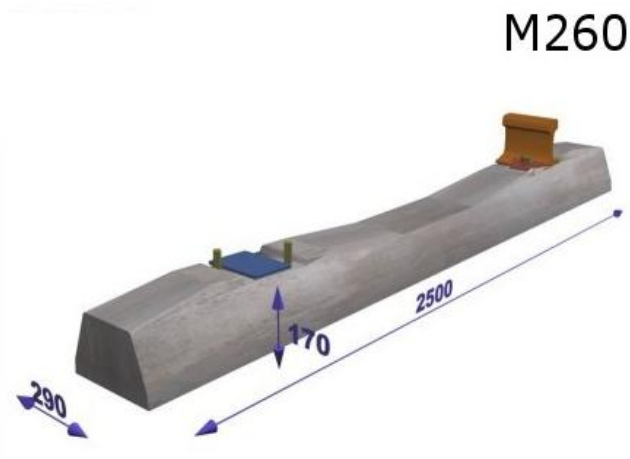


Fig. 8 – Travessa monobloco (Sateba, 2011)

2.3. ELEMENTOS CONSTITUINTES DA SUBESTRUTURA

2.3.1. BALASTRO

O balastro é a camada que distribui as pressões que lhe são transmitidas pelas travessas às subjacentes, proporcionando estabilidade no sentido vertical e horizontal.

Esta camada tem um papel muito importante no funcionamento de uma via-férrea, porque para além de distribuir pressões também serve de apoio às travessas, resiste às acções longitudinais e transversais aplicadas às travessas, absorve as vibrações provocadas pelo movimento, facilita a manutenção da via no que diz respeito a manter o nivelamento e alinhamento, permite o escoamento das águas da chuva, e diminui as possibilidades de ocorrerem efeitos indesejados nas camadas subjacentes devido a acções climáticas (Fortunato, 2005).

Este material não deve possuir coesão e deve ter uma forma granular cúbica, logo é obtido maioritariamente de rochas duras, como granitos, basaltos e quartzitos. É de notar que os exemplos enumerados anteriormente são rochas sãs e resistentes aos agentes atmosféricos. Na figura seguinte podemos observar a forma e disposição do balastro numa via-férrea balastrada (Couto, 2008).

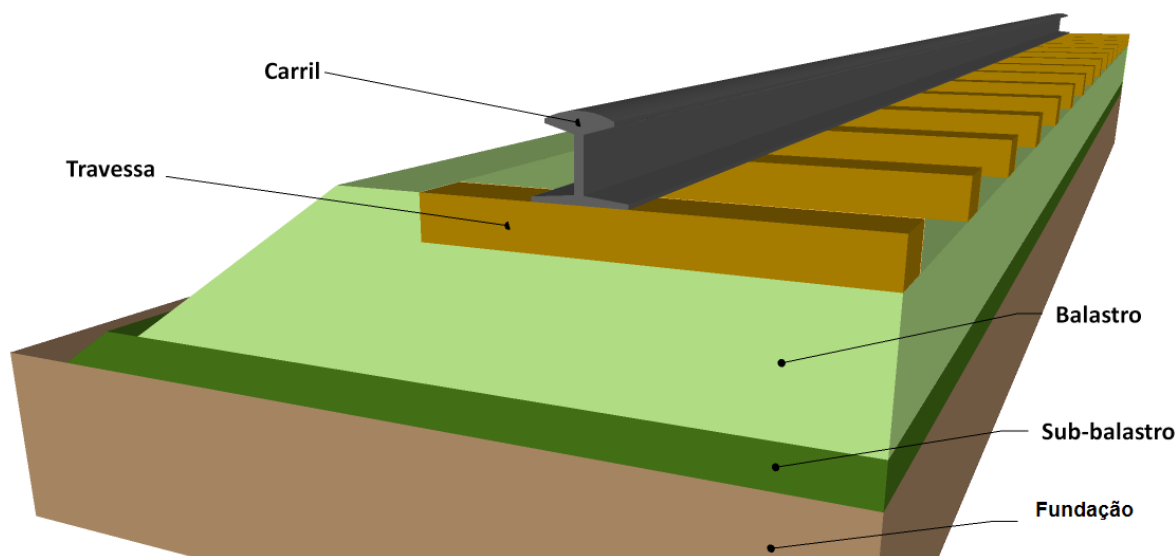


Fig. 9 – Perfil tipo de uma via balastrada

2.3.2. SUB-BALASTRO

O sub-balastro tem como principal função reduzir a tensão que é transmitida à fundação da via, pois esta localiza-se entre o balastro e o solo de fundação, podendo ser constituído por diversas camadas.

Nesta camada podem-se destacar as seguintes funções, separar a fundação do balastro por forma a evitar a interpenetração e a migração do material fino, impedir o desgaste da fundação pelas acções mecânicas que são transmitidas pelo balastro, evitar infiltrações de água na fundação proveniente da superfície, ou seja, funcionar como camada drenante e filtrante.

Por forma a cumprir as funções expostas anteriormente, este material deve ser bem graduado, resistente ao desgaste e a sua granulometria deve consentir as funções de filtro. Geralmente são utilizadas areias cascalhentas misturadas em central, materiais naturais britados ou detritos de pedreiras. Na construção da camada de sub-balastro devemos ter em atenção que a sua inclinação é condicionada pelo rápido escoamento das águas, em algumas situações são aplicados geossintéticos ou betumes asfálticos com o sub-balastro, ou mesmo a substituir totalmente o material granular (Fortunato, 2005).

2.3.3. FUNDAÇÃO DA VIA

A fundação da via é a camada onde se apoiam todos os elementos descritos anteriormente, normalmente esta camada é designada por superfície final das terraplenagens. A grandeza desta camada é variável, visto que se considera toda a camada até onde se façam sentir de forma considerável as solicitações impostas pelo movimento dos veículos.

Esta camada é a que mais condiciona o funcionamento e a construção das camadas de apoio, em algumas situações é mesmo necessário recorrer a melhoramentos ou substituição deste material. Pois esta contribui de forma importante para a degradação das cargas impostas pelo movimento dos veículos assim como afecta a degradação da plataforma.

A fundação tem como funções primordiais, apoiar a plataforma, não ter deformações excessivas, conservar-se estável na fase de exploração da obra, e resistir ao atrito e ao desgaste provocado pelas camadas sobrejacentes.

3

PASSAGENS INFERIORES PRÉ-FABRICADAS E SEU FUNCIONAMENTO

3.1. INTRODUÇÃO

As passagens inferiores surgiram pela necessidade de atravessar, por diversas razões as vias de comunicação, sendo mais comuns nas vias rodoviárias. Com o desenvolvimento das linhas de alta velocidade surgiu a necessidade de utilizar este tipo de passagem inferior, logo foi necessário estudar cuidadosamente os efeitos que as cargas dinâmicas provocam nesta estrutura. Pois ela introduz diferentes heterogeneidades na rigidez e no estado de tensão da via.

O estudo deste tipo de passagem inferior visa procurar soluções eficientes e económicas do ponto de vista construtivo e duradouras. Para se conseguir otimizar estes tipos de soluções é necessário perceber o seu comportamento quando sujeita a cargas dinâmicas. As estruturas pré-fabricadas apresentam vantagens relativamente às estruturas betonadas “in situ”, pois tem grande qualidade construtiva, facilidade de transporte e montagem em obra devido ao seu carácter modular, e comportamentos dinâmicos muito satisfatórios.

As passagens inferiores na sua generalidade são usadas na construção de galerias técnicas, instalação de condutas, passagens hidráulicas, passagens inferiores agrícolas, rodoviárias e pedonais. Na Fig. 10 é apresentada uma passagem hidráulica do tipo box culvert (FARCIMAR, 2011).



Fig. 10 – Passagem inferior pré-fabricada (HANSON, 2011)

No âmbito do trabalho desenvolvido, será dada mais importância às passagens inferiores do tipo box culvert. Serão abordadas algumas soluções existentes assim como processo de dimensionamento e análise estrutural.

3.2. TIPOLOGIA DE BOX CULVERTS PRÉ-FABRICADAS

Os box culverts são soluções que se têm apresentado bastante competitivas na elaboração das passagens inferiores das obras viárias. Normalmente são de betão armado e pré-fabricadas pelas razões anteriormente apresentadas.



Fig. 11 – Exemplo do transporte de passagens inferiores do tipo box-culvert (Rocla, 2011)

Na indústria da pré-fabricação existem diversas soluções para a concepção de box culverts, a escolha por um destes tipos depende das condicionantes em obra. As suas configurações são apresentadas nos pontos seguintes:

- Box culvert de quatro lados formado por uma única peça monolítica (Fig. 12 a)), ou um box culvert duplo (Fig. 12 b));
- Box culvert de quatro lados formado por sobreposição de duas peças em U (Fig. 12 c));
- Box culvert de quatro lados formado por uma peça em U e uma laje de cobertura (Fig. 12 d));
- Box culvert de quatro lados formado por uma laje de fundação e uma peça em U invertida (Fig. 12 e));
- Box culvert de três lados fundada no terreno natural e duas peças em U invertidas (Fig. 12 f)).

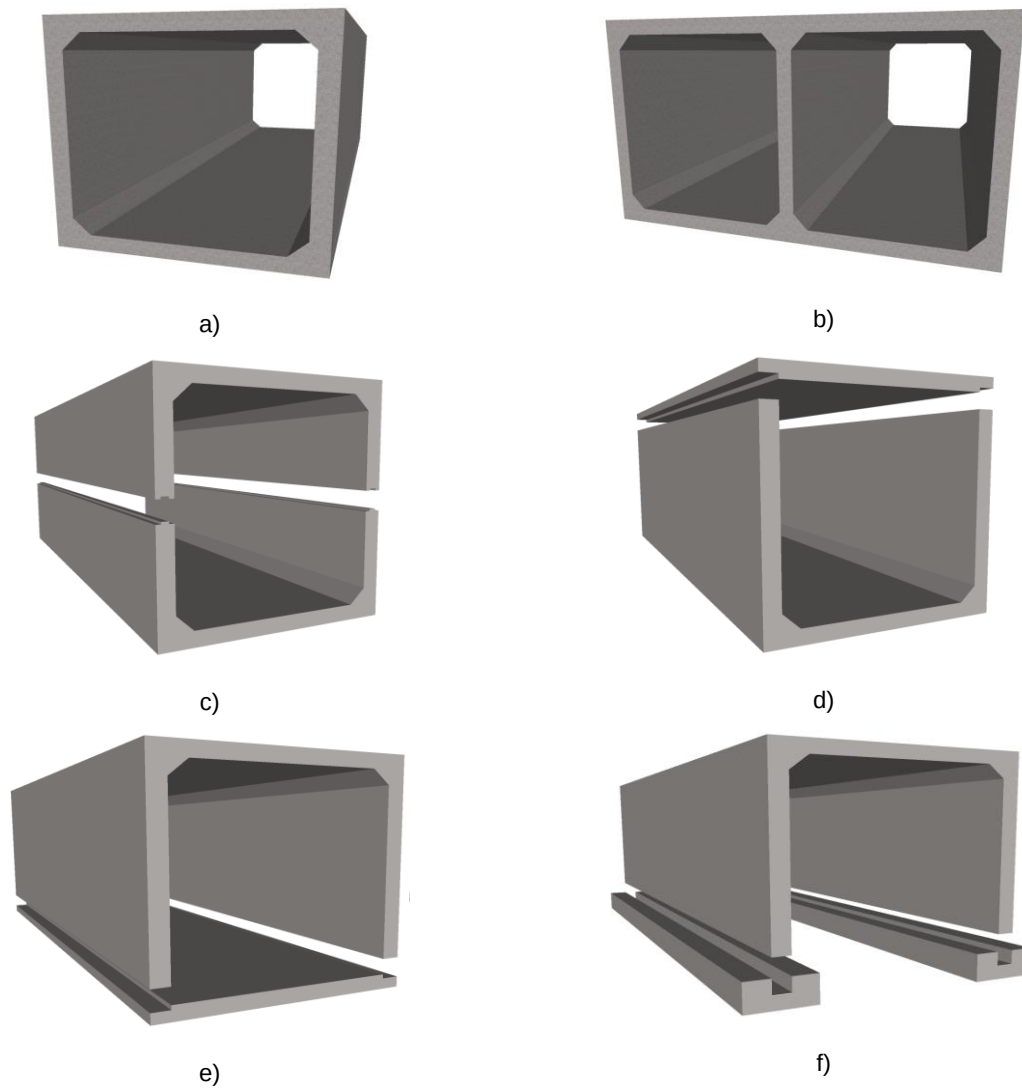


Fig. 12 – Configurações possíveis para a box culvert

Os box culverts além das configurações apresentadas anteriormente também se podem dividir em dois tipos: os flexíveis e os rígidos.

Nos flexíveis a sua capacidade de carga advém da sua reduzida rigidez, pois quando carregado a estrutura tende a deformar-se, originando no solo lateral pressões passivas, flectindo também a travessa superior que por efeito de arco transfere parte da solicitação ao solo envolvente (Fig. 13). No desenvolvimento de alguns estudos verificou-se que a carga máxima que estas estruturas podem estar sujeitas é mais pequena que nas estruturas rígidas.

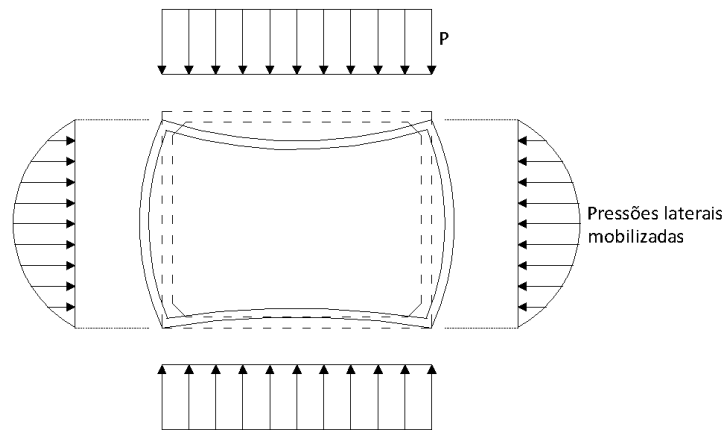


Fig. 13 – Box culvert flexível

Os box culverts flexíveis têm um comportamento diferente dos rígidos pelo facto de apresentarem uma menor rigidez, logo uma maior deformabilidade apresentando assim um mecanismo de redistribuição de tensões diferente. Na Fig. 14 podemos observar a distribuição de tensões provocada sobre a travessa superior, para cada um dos tipos de box culvert.

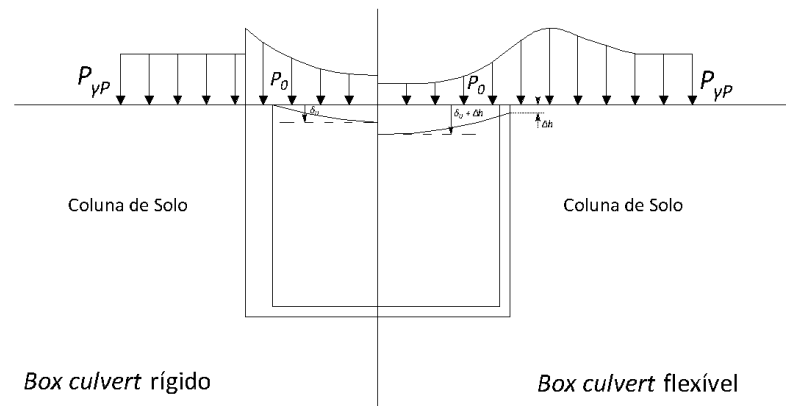


Fig. 14 – Diagrama de pressões sobre a travessa superior para os dois tipos de box culvert (adaptado de (Plumey, 2007))

Por análise das tensões provocadas concluímos que o dimensionamento e funcionamento das box culverts está directamente relacionado com a qualidade do solo envolvente, a interacção entre os dois gera uma transferência de esforços que não pode ser desprezada.

3.3. PROCESSO CONSTRUTIVO DE BOX CULVERTS PRÉ-FABRICADAS

A construção deste tipo de estruturas requer um estudo prévio, do material envolvente da box culvert assim como as dimensões pretendidas. Os diversos constituintes da box culvert são pré-fabricados em estaleiro e posteriormente transportados para a obra para serem montados. Os elementos que constituem o box culvert são fabricados em moldes metálicos previamente montados (Fig. 15) para lhe conferir superfícies lisas e é colocada a armadura antecipadamente conjecturada no interior do molde para se proceder à betonagem e posterior vibração.



Fig. 15 – Molde de pré-fabricação (*Engenhariacivil.com*, 2011)

Para que se proceda à montagem em obra é necessário que se executem alguns trabalhos de preparação do solo de fundação, como a abertura de uma vala para o assentamento das box culverts, a base da vala deve ser compactada, nivelada e lisa por forma a tentar controlar os assentamentos diferenciais. Quando a rigidez da fundação é diferente no desenvolvimento da passagem inferior é necessário substituir o solo com menor rigidez por um material granular seleccionado, com a intenção de homogeneizar as características da fundação. Posteriormente serão colocadas na vala as box culverts com auxílio de guias (Fig. 16).



Fig. 16 – Exemplo de colocação em obra de box-culverts (*Engenhariacivil.com*, 2011)

No caso em que a box culvert é constituída por duas peças em U (Fig. 12 c)), no encaixe deve ser colocado um material elastómero que permita a sua estanqueidade e o bom funcionamento estrutural da mesma (Fig. 17 a)). Depois da colocação em obra deve-se ter em atenção que as juntas verticais e horizontais devem ser seladas com tela asfáltica, para impedir a entrada de solo através das mesmas (Fig. 17 b)).

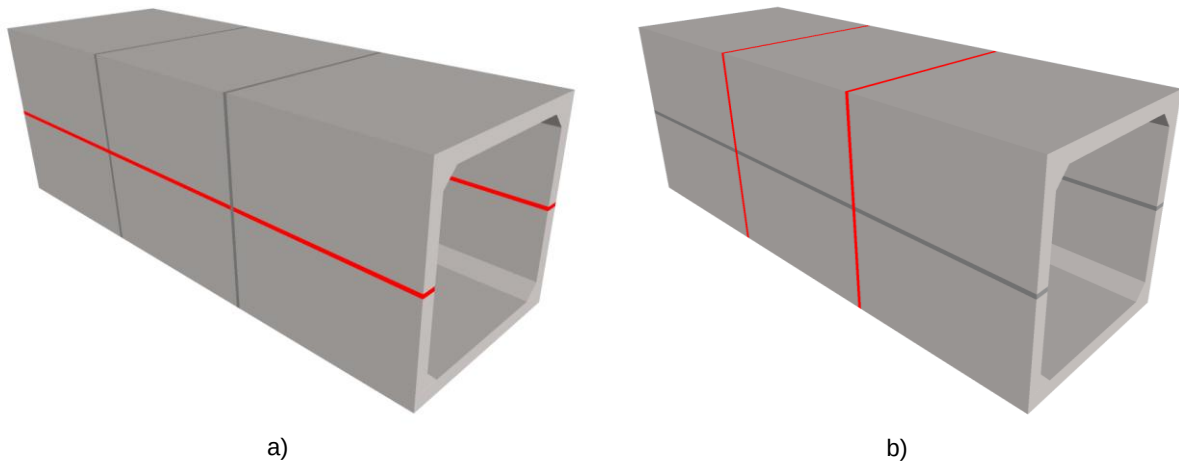


Fig. 17 – a) Exemplo do encaixe entre as peças em U b) Exemplo de juntas horizontais e verticais entre módulos

Para que se verifique um bom funcionamento solo-estrutura é extremamente necessário que exista uma boa drenagem de águas pluviais. Esta é garantida pela aplicação de geotêxtil no exterior da box culvert, na travessa superior e nos montantes. Na base dos montantes são colocados drenos materializados por enrocamento e um tubo furado envolvido por um geotêxtil, que guiará as águas para o exterior. Por fim constroem-se os aterros laterais e superior, obedecendo a todas as premissas estabelecidas no projecto com recurso a equipamentos de terraplenagem (Sang, 2000 e Pinto, 2008).

3.4. ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE BOX CULVERTS

Neste tipo de estruturas as solicitações a que estão sujeitas por parte do solo revelam-se de difícil quantificação, dificultando assim o seu dimensionamento.

Existem diversos factores que condicionam a interacção solo/estrutura, como a rigidez da box culvert, o grau de confinamento, o processo construtivo, o comportamento dos diversos materiais envolventes. Por isso será necessário realizar um estudo cuidadoso para perceber quais as cargas que estão a afectar a estrutura, alcançando assim a solução ideal em relação à segurança/economia.

3.4.1. MÉTODOS DE ANÁLISE

Para se determinarem os esforços que actuam na estrutura tem que se ter em atenção diversas condicionantes que os podem influenciar. Estas condicionantes podem ser as descontinuidades que definem a interface solo/estrutura e o faseamento construtivo dos aterros que geram assentamentos entre o solo e a estrutura, também as diferenças de rigidez podem induzir uma redistribuição de esforços nas zonas mais rígidas da box culvert.

Na Fig. 18 são exemplificados os deslocamentos que os solos de aterro podem sofrer, encontrando-se o aterro dividido em três blocos por simplificação.

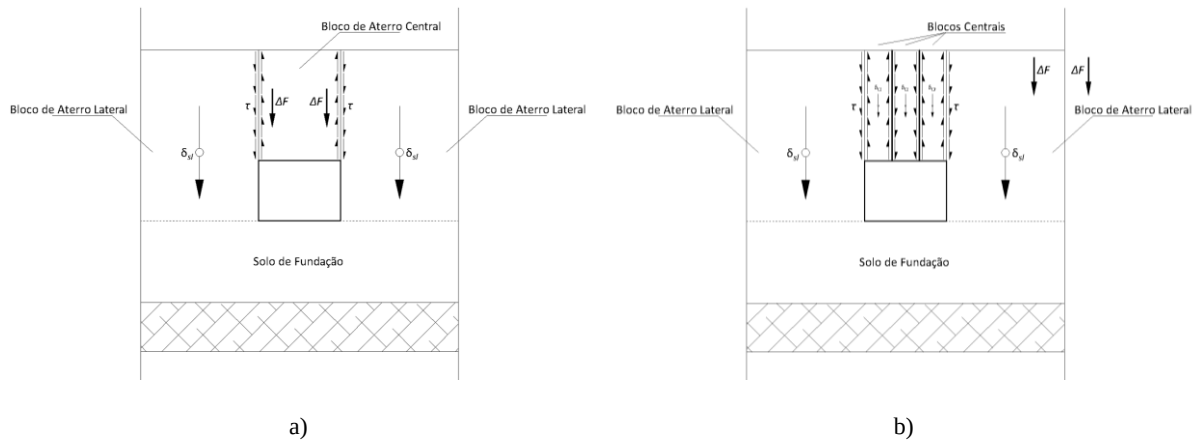


Fig. 18 - Redistribuição de cargas na box culvert a) Box culvert rígido b) Box culvert flexível (adaptado de (Sang, 2000))

Os deslocamentos dos blocos laterais e do bloco central (δ_{sl}), mobiliza tensões tangenciais nas interfaces do bloco, originando incrementos de carga (ΔF) sobre a travessa da box culvert. A redistribuição de tensões é mais acentuada quanto mais rígido for o terreno de fundação, menor compactação dos aterros laterais e quanto mais rígida for a estrutura da box culvert.

Através do comportamento atrás mencionado concluímos que a interação entre blocos provoca um acréscimo de tensões normais na travessa superior da box culvert e menor incidência nas zonas próximas dos montantes. Nas estruturas flexíveis pode-se observar um decréscimo de tensões a meio vão da travessa superior.

Como se pode constatar a redistribuição de esforços depende da influência de muitos factores, por isso é necessário realizar uma avaliação de esforços por intermédio de modelos numéricos, que permitam representar a existência de descontinuidades, comportamento não linear dos materiais e um processo construtivo faseado. Visto que esta modelação se torna muito complexa, surgiu a necessidade de criar modelos de análise simplificados baseados em teorias simples. Porém conduzem em algumas situações a sobredimensionamentos e noutras a subdimensionamentos. Posto isto e com o desenvolvimento dos meios computacionais, tem-se verificado uma maior implementação dos métodos numéricos. Estes devem ser devidamente calibrados por comparação de situações semelhantes observadas *in situ* e posteriormente desenvolver estudos de novos problemas (Sang, 2000).

3.4.1.1. MÉTODOS SIMPLIFICADOS

Neste ponto será apresentada uma breve descrição de alguns métodos simplificados. Quando se perspectiva dimensionar uma estrutura deste género será necessário conhecer todas as acções que esta pode estar sujeita. Estas solicitações são o peso próprio da box culvert, pressões geostáticas devidas ao aterro, pressão hidrostática externa, pressão ou depressão interna, cargas externas, peso do eventual equipamento instalado no interior, equipamento fixo instalado sobre a box culvert e temperatura.

Depois de conhecer as possíveis cargas é necessário estipular o que cada uma contribui na pressão que efectivamente é transmitida à estrutura. Se esta se encontrar sobre um aterro de altura elevada a influência das cargas móveis originadas pelo tráfego rodoviário/ferroviário diminui significativamente

e pelo contrário quando o aterro apresenta uma altura reduzida as pressões geostáticas são diminutas perante as acções móveis externas (Pinto, 2008).

No caso das cargas móveis podem-se distinguir dois tipos, as rodoviárias e as ferroviárias. As cargas rodoviárias não colocam complicações para saber quais as pressões introduzidas na estrutura, mas pelo contrário as ferroviárias causam sérias dificuldades na determinação das pressões introduzidas. A passagem do comboio nas zonas de transição deve merecer especial atenção de forma a perceber como se conjugam as diversas variáveis.

Os modelos simplificados para alturas de aterro reduzidas possibilitam obter soluções aceitáveis, pois a redistribuição de esforços não é muito relevante. Inicialmente os box culverts eram dimensionados considerando um quadro biarticulado, sujeito a um carregamento simétrico constante (Fig. 19) (Sang, 2000).

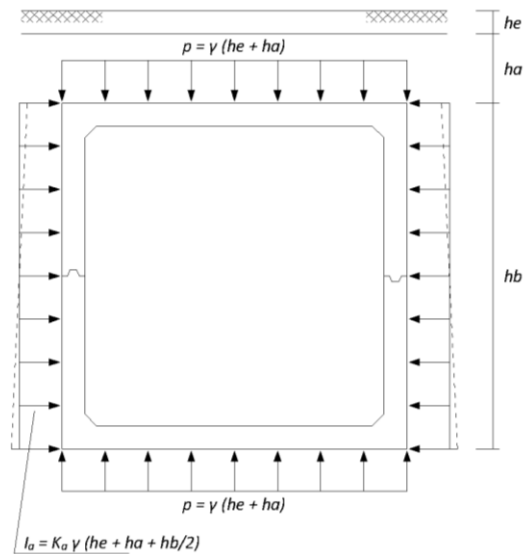


Fig. 19 – Modelo de análise simplificado para o dimensionamento de box culverts (adaptado de (Sang, 2000))

Para o cálculo da uma estrutura segundo o modelo anterior a sobrecarga é convertida numa altura de aterro equivalente (he) e os impulsos de terras com valor igual ao valor médio dos impulsos activos de terra. O peso próprio da estrutura é desprezado assim como a interacção solo estrutura. A configuração da estrutura permite a sua simetria (geométrica e acções), logo se podem obter os esforços mais facilmente.

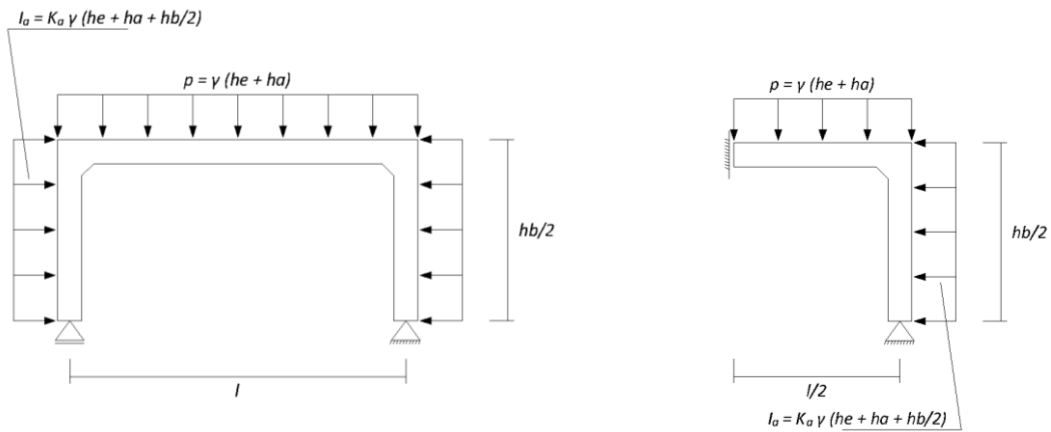


Fig. 20 – Simplificações do modelo inicial (Fig. 19) tirando partido da sua simetria (adaptado de (Sang, 2000))

Por forma a tentar melhorar o processo de cálculo e aproximar ao máximo os valores dos impulsos de terras nos montantes e especialmente na travessa inferior da estrutura, passou a ser considerada uma box culvert como um pórtico sobre apoios elásticos (Fig. 21). Nesta situação os impulsos de terras são considerados iguais aos impulsos em repouso, mantendo todos os pressupostos de cálculo anteriores.

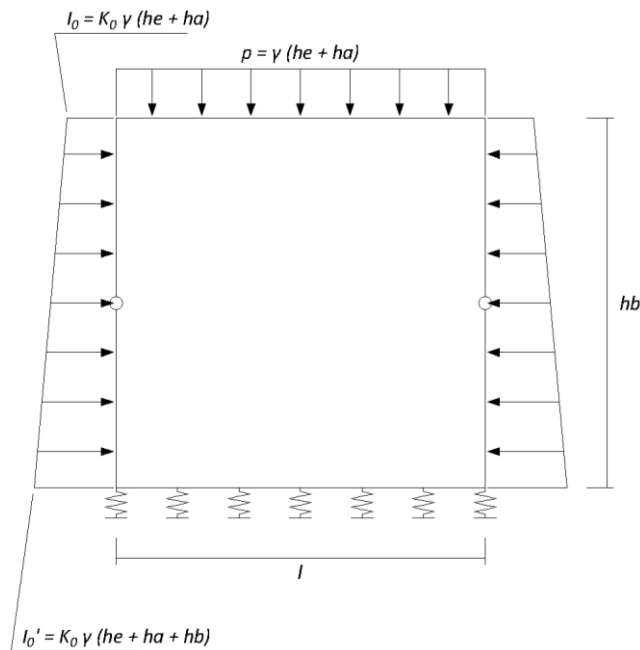


Fig. 21 – Consideração do modelo da box culvert como um pórtico com apoios elásticos (adaptado de (Sang, 2000))

Apesar de todos os modelos apresentados anteriormente permitirem o cálculo deste tipo de estruturas, continuam a desprezar a interacção solo estrutura e as diferenças de rigidez entre o solo e a estrutura. Para suprir essa lacuna foi criado mais um modelo de cálculo que agrava as tensões normais sobre a travessa superior da box culvert, considerando uma variação das tensões sobre a mesma de um valor mínimo na zona central e com o valor máximo nos montantes.

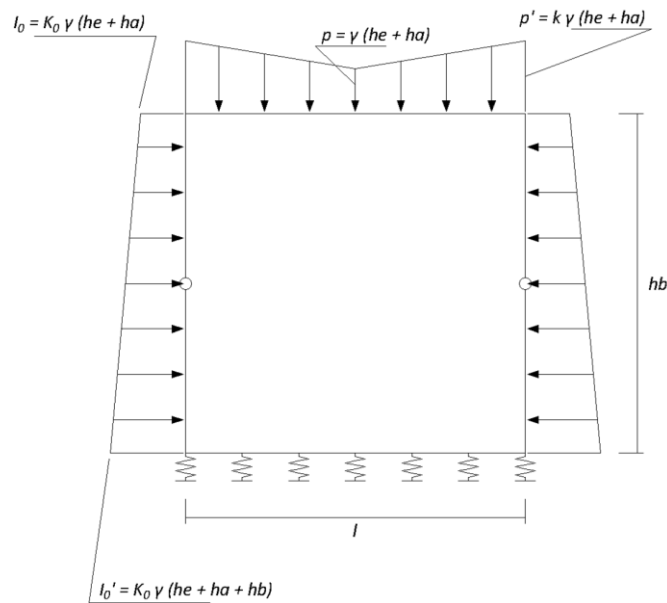


Fig. 22 – Modelação da estrutura do box culvert como um pórtico suportado por apoios elásticos, com a acção sobre a travessa superior igual ao peso da coluna de aterro agravada por um factor k (adaptado de (Sang, 2000))

O coeficiente k é determinado por extrapolação da teoria de Marston que são resultados de estudos de condutas circulares enterradas. Como a geometria das peças relacionadas e os mecanismos de interacção solo estrutura são diferentes conclui-se que não permitem um correlacionamento com erros desprezáveis (Sang, 2000).

Nos modelos de cálculo apresentados anteriormente podemos concluir que apenas diferem no diagrama de pressões que solicita a travessa superior e na utilização de impulsos activos ou de repouso no cálculo dos diagramas dos montantes. Estas variáveis influenciam principalmente os diagramas de momentos flectores e esforços transversos.

3.4.2. COMPORTAMENTOS DINÂMICOS DE BOX CULVERTS

Quando se analisam os efeitos dinâmicos provocados por um comboio numa via-férrea de alta velocidade, em que a passagem inferior é próxima da via, estes devem ser cuidadosamente estudados por forma a definir quais as solicitações aplicadas à estrutura.

Este tipo de estrutura quando se encontra numa via-férrea provoca uma variação de rigidez e tensões na direcção longitudinal e transversal. Este efeito provoca um acréscimo de sobrecargas dinâmicas, que levam a uma maior degradação da parte superior do aterro e a assentamentos diferenciais à superfície.

Em seguida será apresentado um estudo de comportamento dinâmico de González, (2006) realizado no âmbito das linhas de alta velocidade com recurso ao método dos elementos finitos, abordando os problemas criados pelas variações de rigidez da via.

3.4.2.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Para o desenvolvimento deste estudo (González, 2006) foi necessário parametrizar o problema por forma a desenvolver um modelo com base no método dos elementos finitos. Nesta definição de parâmetros foram escolhidos os de maior relevância:

- Tipo e dimensão da estrutura (l e d);
- Altura de aterro sobre a estrutura (entre o topo da estrutura e o limite inferior da camada de balastro (r));
- Módulo de elasticidade do aterro (E_0) e da fundação (E_b).

Na Fig. 23 é apresentado um esquema da definição dos parâmetros em estudo, completado pelo Quadro 1 onde constam os valores utilizados na análise paramétrica.

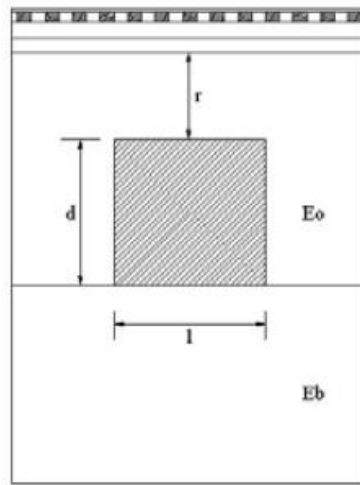


Fig. 23 – Esquematização dos parâmetros abordados no estudo em causa

Quadro 1 – Valores da análise paramétrica

r (m)	d (m)	$\varepsilon(l/d)$	E_0 (MPa)	E_b (MPa)
0,10	0,50	1,00	45	45
0,50	1,50	2,00		225
1,00	2,50	4,00		4500
1,50				
2,00				
2,50				
3,00				

Depois de ponderados os parâmetros a analisar foi realizado um estudo paramétrico onde se define a rigidez da linha. Esta é considerada como um acréscimo relativo da rigidez de referência, (k_0) num aterro ferroviário sem qualquer estrutura no interior, o valor de rigidez máximo (k_{max}) é considerado como próximo da estrutura.

$$\frac{k_{m\acute{a}x} - k_0}{k_0} = \frac{\Delta k}{k_0} \quad (3.1)$$

Através da expressão (3.1) foram construídas as curvas de variação de rigidez representadas na Fig. 24. Os diferentes elementos estruturais analisados têm dimensões de 2,5 x 2,5 metros, com uma altura de aterro de 1 metro e um solo de fundação rígido ($E_b = 4500 \text{ MPa}$). Das três estruturas analisadas a que apresenta uma maior variação de rigidez é a que é constituída por um bloco rígido. Neste caso vai ser avaliada a influência das variáveis apresentadas no Quadro 1 (Fig. 25).

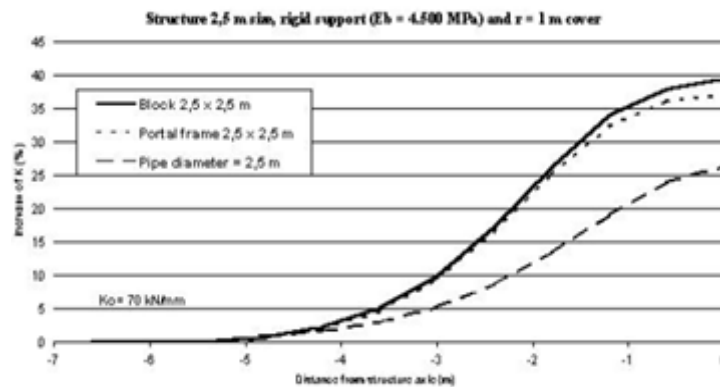


Fig. 24 – Variação da rigidez da via para três estruturas distintas

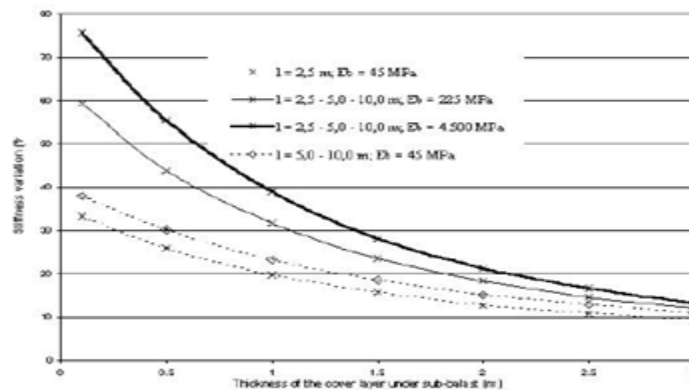


Fig. 25 – Variação da rigidez da via para diferentes alturas da camada de recobrimento

Para a avaliação dos efeitos dinâmicos foi criado um modelo numérico que simula o comportamento dum eixo ferroviário utilizando as curvas de rigidez apresentadas anteriormente. No modelo desenvolvido foram adoptados parâmetros similares aos utilizados nas linhas de alta velocidade. Estes são: massas utilizadas no sistema comboio/carril, rigidez da suspensão e coeficientes de amortecimento. Os resultados apresentados são para uma estrutura de 2,5 x 2,5 metros a uma velocidade de 300km/h.

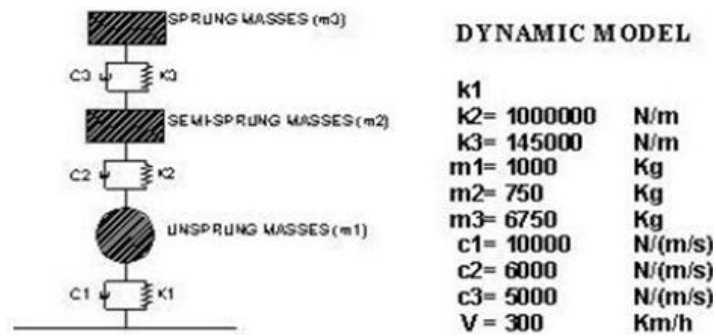


Fig. 26 – Modelo de cálculo dinâmico

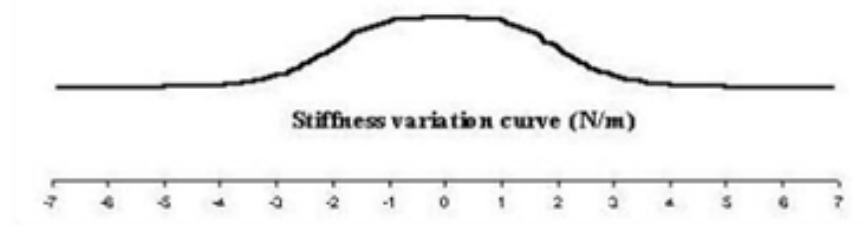


Fig. 27 – Lei de variação da rigidez (N/m)

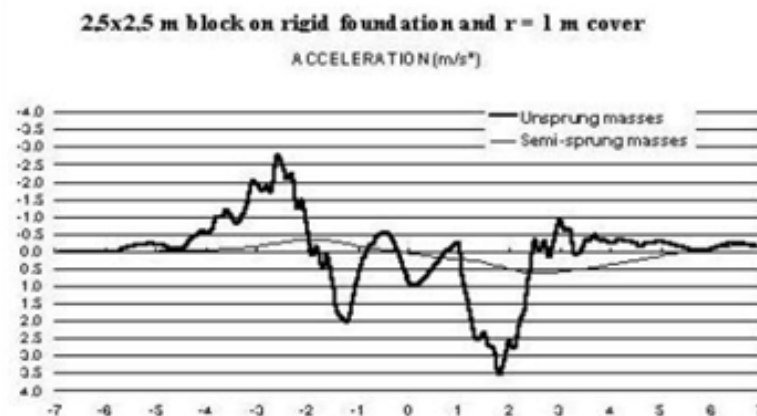


Fig. 28 – Evolução da aceleração vertical (m/s²) durante a passagem das massas não suspensas e semi-suspensas para uma estrutura de secção 2,5x2,5 m fundada num solo indeformável, com uma altura acima da estrutura de 1 m

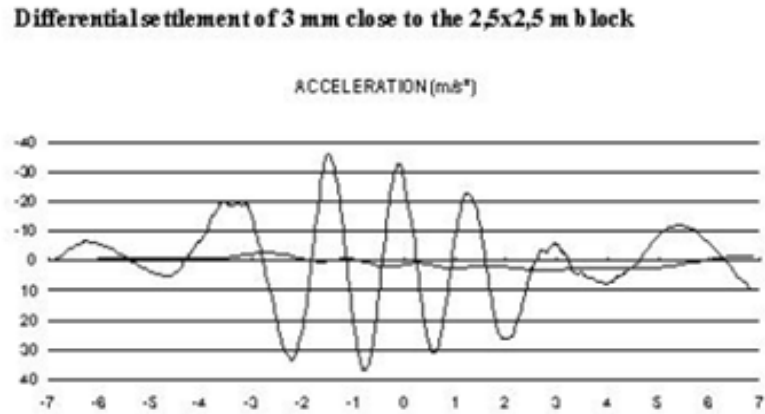


Fig. 29 – Acelerações verticais obtidas para a passagem das cargas, com um assentamento diferencial de 3 mm no terrapleno de acesso à estrutura de 2,5x2,5 m

Através dos resultados apresentados os autores concluíram que a rigidez tem uma variação máxima na proximidade das paredes laterais da estrutura (Fig. 27). Sendo nesta zona onde as acelerações atingem o seu máximo, assim como as sobrecargas dinâmicas. As sobrecargas dinâmicas cooperam para o aumento da carga por eixo, logo aumenta a aceleração. Para perceber como as acelerações vão variar os autores impuseram um assentamento diferencial de 3 milímetros na zona de transição que leva a grandes sobrecargas dinâmicas (Fig. 29).

Na análise da variação do estado de tensão conclui-se que quando uma carga se aproxima da estrutura, o estado de tensão altera-se na camada inferior ao balastro (Fig. 30). Verifica-se na caracterização do estado de tensão que quando não existem estruturas enterradas o $\sigma_1 = \sigma_z$. Mas quando se sucede o contrário as tensões principais (σ_1) sofrem uma rotação e deixam de coincidir com as tensões verticais (σ_z). Na Fig. 31 estão demonstrados os resultados obtidos para os incrementos de tensão para as três alturas de aterro sobre a box culvert diferentes ($d = 0,5; 1,0; 2,5 (m)$) em função do mesmo módulo de deformabilidade da fundação (E_b).

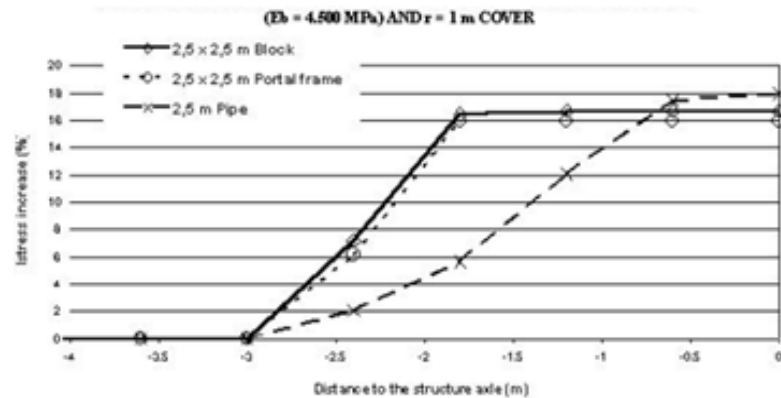
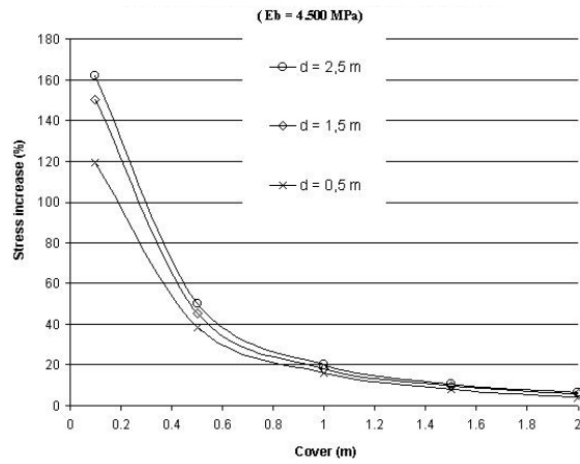
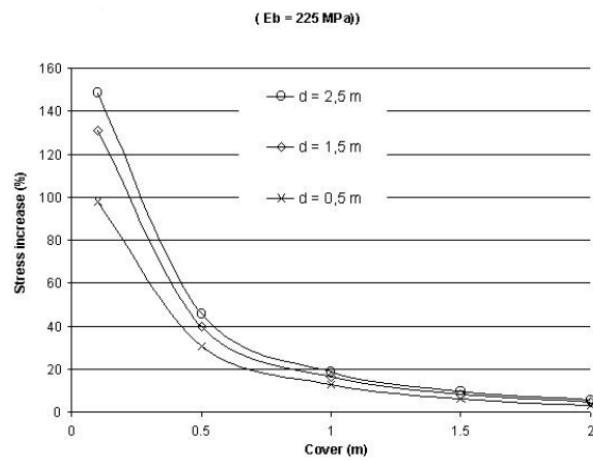


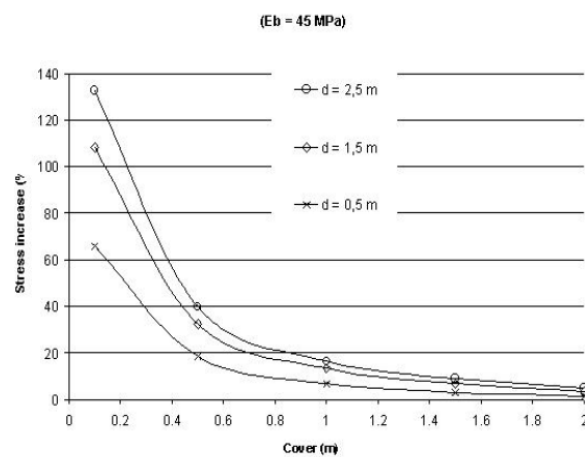
Fig. 30 – Aumento das tensões em função da distância à estrutura



a)



b)



c)

Fig. 31 – Evolução dos incrementos de tensão para cada altura de aterro, fixando os módulos de deformabilidade da fundação, a) fundação rígida b) fundação semi-rígida c) fundação flexível

Por análise da Fig. 31 que resume os resultados obtidos para as análises realizadas, é possível concluir que a variação das tensões diminui rapidamente para alturas de aterro entre 0 e 1 metro. E a diminuição é menos significativa para alturas de aterro com mais de 1 metro, sendo também pouco afectada pela dimensão da estrutura quando a camada de fundação é rígida.

4

ZONAS DE TRANSIÇÃO EM VIAS DE ALTA VELOCIDADE: NORMAS E PRINCIPAIS PROBLEMAS

4.1. INTRODUÇÃO

Nas vias férreas é normal ocorrerem variações de rigidez vertical, isto leva a que em algumas zonas da via existam algumas irregularidades. Estas variações são responsáveis pelas amplificações dinâmicas que podem surgir em zonas mais críticas, contribuindo assim para a deformação da via, bem como o aumento dos assentamentos diferenciais. Deste modo conclui-se que os efeitos dinâmicos são mais importantes, quanto maior for a velocidade de circulação e a diferença de rigidez da via (Alves Ribeiro, 2008).

As zonas da via que estão mais vulneráveis a variações de rigidez são (Fortunato, 2009):

- Zonas de entrada e saída de obras de arte;
- Zonas de passagens inferiores;
- Passagem de aterro para escavação, e vice-versa;
- Transição em via balastrada e não balastrada;
- Zonas onde se encontram aparelhos de mudança de via.

Nas zonas enumeradas anteriormente é frequente surgirem diversos problemas como assentamentos diferenciais e redução da vida útil da via. Assim é necessário proceder a inspecções regulares nestas zonas, por forma a identificar e corrigir estas anomalias o mais cedo possível. É ainda de referir que a rigidez da via pode ser influenciada pela má qualidade dos solos de fundação.

Com o intuito de reduzir estes problemas da via, e melhorar a sua segurança. Hoje em dia são utilizadas soluções tipo de transição que tem como principal função promover na via uma variação de rigidez gradual. Estas soluções são compostas por materiais criteriosamente seleccionados e devidamente compactados.

Para que sejam garantidas todas as condições de segurança e operacionalidade, surgiu a necessidade de desenvolver recomendações e regras com o intuito de facilitar a cooperação técnica internacional, desenvolvendo assim o transporte ferroviário.

4.2. PROBLEMAS RELATIVOS À VIA

Os problemas da via são normalmente devidos a forças verticais que contribuem para a degradação dos diferentes elementos e para os assentamentos da via. A força vertical é transmitida pela roda do comboio ao carril, sendo dividida em duas componentes: estática (devido ao peso do veículo) e dinâmica. Estas forças têm sentido descendente na zona carregada do carril e ascendente nas zonas mais afastadas, devido à flexão longitudinal do carril, num determinado instante de tempo (Fig. 32).

As forças ascendentes provocam na superestrutura no instante do carregamento um levantamento que tem que ser compensado por uma força contrária de intensidade maior ou igual à aplicada pela roda do comboio. Esta força é gerada pelo peso das travessas e dos carris, associado ao atrito que se desenvolve entre as travessas e o balastro. Sendo que este fenómeno se desenvolve em toda a extensão da via-férrea mas em instantes diferentes (Fortunato, 2005).

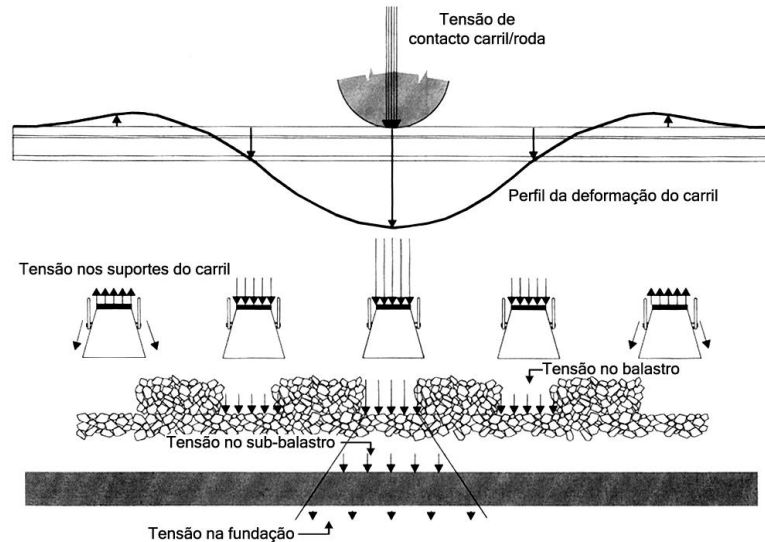


Fig. 32 – Tensões devido às forças verticais numa via-férrea balastrada (Fortunato, 2005)

Quando se trata de zonas de transição, a degradação da via acentua-se, pois devido à má compactação dos solos de fundação, ou aos assentamentos relativos entre o aterro e a estrutura surgem assentamentos diferenciais que agravam os efeitos dinâmicos. Este fenómeno é conhecido por “Bump” que surge nestas zonas, podendo causar graves danos na segurança de circulação e no conforto dos passageiros. Logo é necessário controlar os assentamentos ocorridos tanto no solo de fundação como na cunha de transição, garantindo que foi executada uma devida compactação dos solos utilizados. Apesar destas precauções é necessária uma maior manutenção destas zonas devido a este fenómeno. Estes assentamentos diferenciais provocam curvaturas no plano vertical da via, que tendem a aumentar com a passagem dos comboios neste local como se pode observar na Fig. 33.

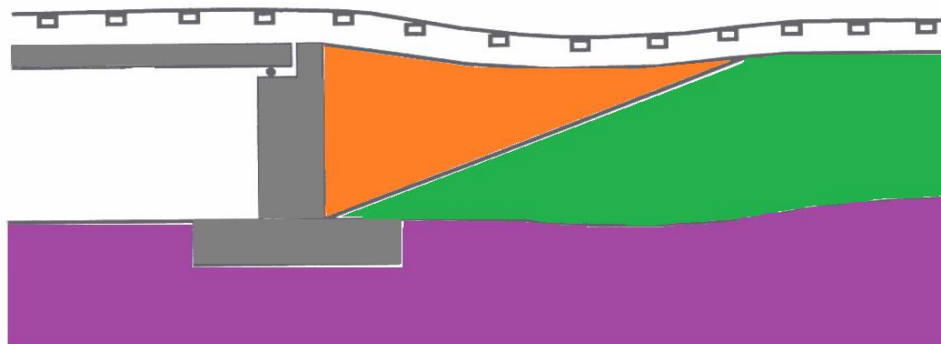


Fig. 33 – Fenómeno de “Bump” nas zonas de transição (adaptado de (ERRI, 1999))

4.2.1. DEFEITOS DE GEOMETRIA NA VIA-FÉRREA

As deformações que podem ocorrer na via-férrea são normalmente devido a solicitações transmitidas pelos comboios. Estas deformações provocam a degradação da sua geometria na vertical e na horizontal. Estas solicitações são transmitidas à fundação e dependem em grande parte das velocidades de circulação, da intensidade e da frequência de aplicação. Neste fenómeno de transmissão a superestrutura tem um papel importante, pois o tipo de carril, o espaçamento entre travessas, o estado de conservação e a espessura do balastro são factores condicionantes para uma devida degradação das cargas, que por sua vez são transmitidas à fundação.

Em alguns casos as solicitações transmitidas à fundação são demasiado elevadas, o que leva a assentamentos que provocam uma deformação na via que irá afectar o seu comportamento estrutural.

Nas zonas de transição as irregularidades na geometria vertical da via, ocorrem ao longo de um comprimento de cerca de cinco metros (7 ou 8 travessas) ou mais, dependendo da velocidade de circulação. Estas deformações agravam-se exponencialmente com o tempo, após alguns milímetros de deformação.

Quando estas deformações se verificam em zonas de transição a segurança de circulação poderá ser posta em causa. Estas deformações obrigam a um aumento dos custos de manutenção, e poderão afectar a circulação na via-férrea de diversas formas (ERRI, 1999):

- Desgaste do material circulante e dos carris;
- Limitações nas velocidades de circulação, e na carga por eixo dos veículos;
- Aumento das vibrações e do ruído;
- Redução do conforto dos passageiros.

Depois de se constatarem defeitos verticais na geometria da via-férrea, facilmente surgirão defeitos horizontais, podendo dizer-se que estes efeitos estão directamente ligados. As forças horizontais são provocadas pela circulação do comboio e pela encurvadura da via. Estas deformações só poderão ser evitadas através de uma frequente manutenção que irá garantir que as irregularidades se mantenham dentro dos limites exigidos.

4.2.2. EFEITO DAS TRAVESSAS FLUTUANTES

Em alguns casos depois da deformação da via-férrea, é normal existirem travessas nesta zona que se encontram ligeiramente desligadas da camada de balastro, a estas dá-se o nome de travessas flutuantes. Este fenómeno é de difícil percepção uma vez que os defeitos verticais na geometria da via apenas são perceptíveis quando esta é carregada, devido à rigidez vertical dos carris.

Quando se verifica o carregamento da via pela passagem de um comboio, as travessas são carregadas no sentido descendente até encontrarem a camada de suporte materializada pelo balastro. Este movimento introduz no balastro e na fundação cargas de elevado impacto que aumentam os assentamentos logo uma rápida deterioração da via (ERRI, 1999).

4.2.3. DIMINUIÇÃO DA RESISTÊNCIA LATERAL DA VIA

Os efeitos causados pelas travessas flutuantes provocam uma diminuição de resistência lateral da via. Como as travessas não se encontram assentes no balastro este sofre uma rápida deterioração, logo o risco de encurvadura da via aumenta.

As forças introduzidas pelo arranque e frenagem do comboio combinadas com os efeitos de temperatura, retracção e fluência da estrutura se não existirem juntas de dilatação, podem provocar esforços longitudinais elevados nos carris e degradação do balastro. Estes fenómenos são máximos nas zonas de transição, pois é nesta que a resistência lateral do balastro é mínima, pondo em causa a segurança de circulação, o aumento dos assentamentos da via e provocar a encurvadura dos carris (Fig. 34) principalmente quando estes são contínuos soldados ou mesmo levar à sua rotura.



Fig. 34 – Exemplo do fenómeno de encurvadura dos carris (*jornal oexpresso*, 2011)

A utilização de carris contínuos favorece os efeitos dinâmicos, mas como são estruturas com grandes desenvolvimentos, quando sujeitos a variações de temperatura podem sofrer significativas variações de comprimento. Associado a esta variação de comprimento surgem forças axiais de natureza térmica, mas como os carris estão impossibilitados de se deslocar longitudinalmente, desenvolvem-se tensões tangenciais que tendem a aumentar quando a resistência lateral concedida pelo balastro é anulada, assim pode ocorrer o fenómeno de encurvadura dos carris (Fig. 35). Como foi referido anteriormente a resistência lateral do balastro é mínima nas zonas de transição, logo é mais propício que este fenómeno ocorra nestas zonas.

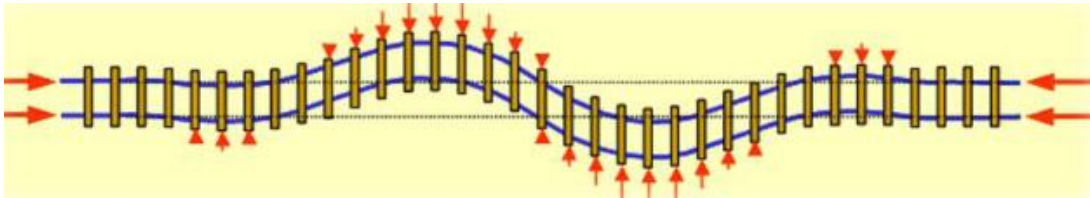


Fig. 35 – Forma típica da encurvadura dos carris e direcção dos esforços gerados (Esveld, 2001)

Muitas vezes a encurvadura dos carris pode impossibilitar a circulação dos comboios, logo é necessário providenciar a reabilitação da via.

4.2.4. FACTORES QUE INFLUENCIAM O APARECIMENTO DE DEFEITOS NA GEOMETRIA DA VIA

A variação brusca de rigidez nas zonas de transição entre o aterro e a estrutura, é o principal factor de degradação de uma via-férrea. Parte da elasticidade da via é fornecida pelo balastro e pela deformação da fundação que detém a maior parte. Por isso é perceptível que sobre a estrutura não é possível ter os mesmos níveis de deformação, assim surge uma variação brusca de rigidez da via.

Esta variação de rigidez introduz no aterro uma grande sobrecarga, mesmo que a geometria da via se encontre em plenas condições. A sobrecarga gerada é a principal responsável pela rápida degradação da via nas zonas de transição. Com o passar do tempo os assentamentos diferenciais vão aumentando agravando-se assim as cargas dinâmicas. Para solucionar este problema construíram-se cunhas de transição com materiais tratados e granulares, de forma a proporcionar um aumento gradual de rigidez, minimizando assim os defeitos que a variação de rigidez poderá provocar (ERRI, 1999).

Mas não é só a variação brusca de rigidez nas zonas de transição que provoca defeitos na geometria da via. A seguir são enumerados os principais factores que podem ser os causadores de tais defeitos (ERRI, 1999):

- Diferença de rigidez entre o aterro e a estrutura (atrás mencionado);
- Tipo de via sobre a estrutura;
- Rigidez à flexão da estrutura;
- Número de comboios sobre a estrutura;
- Efeitos da temperatura na estrutura;
- Existência, ou não, de cunhas de transição.

O tipo de via-férrea sobre a estrutura pode ser justificado pelo facto de existirem duas formas de instalar a via, podendo ser aplicada directamente ou com balastro. Estes dois tipos de soluções diferem no seu comportamento, no que diz respeito aos efeitos térmicos e à elasticidade da via. No caso de uma via não balastrada podemos dizer que os efeitos térmicos são mais gravosos, apresentando também uma menor elasticidade vertical. Logo uma via deste tipo introduz maiores diferenças de rigidez na transição por isso são gerados efeitos dinâmicos mais gravosos.



Fig. 36 – Via-férrea não balastrada da linha de alta velocidade Chinesa (*Jornal do Comércio*, 2011)

A rigidez à flexão da estrutura é também um importante factor na degradação da geometria da via, pois quanto menor a rigidez maior rotação nos extremos, gerando assim maiores deformações junto à transição. É de ter em atenção que este factor causa uma maior deformação, quanto maior for o número de comboios a circular sobre a estrutura.

4.3. PROBLEMAS RELATIVOS À GEOTECNIA

Com o desenvolvimento das linhas de alta velocidade europeias, aumentando tendencialmente as velocidades de circulação assim como as cargas por eixo, surge a necessidade de manter a qualidade da via em toda a sua extensão abrangendo portanto as zonas mais problemáticas como as zonas de transição.

Para que a qualidade da via se mantenha em todo o seu desenvolvimento é necessário resolver diversos problemas geotécnicos, que poderão surgir visto que uma via-férrea pode ter vários quilómetros de extensão, tendo com certeza distintos solos de fundação. Os problemas geotécnicos dependem do tipo de obra de arte em causa na zona de transição, pois estes problemas são normalmente mais graves em estruturas mais antigas do que em estruturas mais recentes. Tal é devido ao grande desenvolvimento da geotecnia nos últimos anos assim como os equipamentos de construção. Logo os materiais utilizados são criteriosamente seleccionados e tratados se for o caso e devidamente compactados.

Alguns dos problemas que surgem nas zonas de transição podem ter diversas causas como a compactação insuficiente, elevadas cargas dinâmicas e cíclicas, construção em solos inadequados sem qualquer tratamento e falhas no sistema de drenagem (Fig. 37). Estas situações podem por em causa o normal funcionamento da via assim como toda a sua estrutura.



Fig. 37 – Exemplo de falhas no sistema de drenagem de uma via-férrea (webtranspo, 2009)

4.3.1. ASSENTAMENTOS

Os assentamentos são a principal causa de problemas nas zonas de transição, contribuindo para uma rápida degradação da via. Estes assentamentos podem ter diferentes origens como na cunha de transição, no solo de fundação e no balastro.

Se a compactação do material constituinte da cunha de transição não for devidamente executada, esta terá assentamentos. Este problema tem vindo a diminuir, pois são normalmente utilizados materiais adequados, e a construção do aterro é devidamente controlada, isto porque hoje em dia se presta muito pela qualidade da construção apesar de surgirem porventura alguns problemas.

Os assentamentos dos solos de fundação são dos problemas mais comuns das zonas de transição. Estes assentamentos tendem a aumentar no tempo devido aos efeitos dinâmicos e à própria consolidação do terreno natural. Uma das consequências do assentamento da fundação é o chamado fenómeno de “bump”, explicado no ponto anterior. Nesta situação os trabalhos de manutenção da via devem ser muito regulares.

É de notar que o próprio balastro também pode provocar assentamentos nas zonas de transição, quando este for defeituosamente compactado depois da manutenção da via. Isto porque quando se coloca balastro sobre a antiga camada esta já está devidamente compactada pelo tráfego dos comboios, logo irá sofrer maiores deformações que a antiga, provocando assim assentamentos diferenciais na zona de transição.

4.3.2. ASSENTAMENTOS DEVIDO À DEGRADAÇÃO DO BALASTRO

A degradação do balastro é uma consequência que está directamente ligada à interacção aterro estrutura nas zonas de transição. Esta camada degrada-se em função do tempo devido às cargas dinâmicas e cíclicas que sofre pelo movimento dos comboios. Este fenómeno pode ocorrer tanto na zona da estrutura como na do aterro, o que pode provocar este fenómeno são as irregularidades da via, que se traduzem por um aumento de forças dinâmicas e eventualmente pela má qualidade do material que constitui a camada de balastro.

4.3.3. DESLIZAMENTO DAS CAMADAS DE ATERRO E DO BALASTRO

As deformações por corte dos taludes, é um fenómeno muito particular de vias-férreas antigas, devido à inclinação exagerada dos taludes pode ocorrer o seu colapso, ou seja o deslizamento do balastro e do aterro. As elevadas cargas dinâmicas e cíclicas que o tráfego ferroviário induz na via pode provocar a deformação por corte dos taludes, induzindo o assentamento da via. Em zonas onde existem grandes variações de temperatura, o fenómeno de gelo/degelo pode ocorrer varias vezes, provocando o deslizamento das camadas de balastro e aterro, devido a estas variações térmicas.

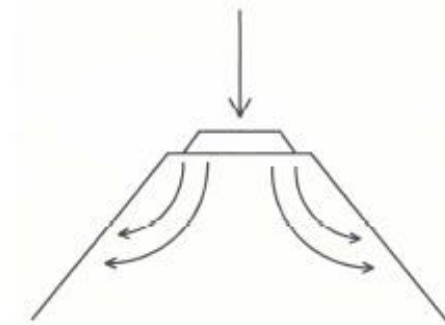


Fig. 38 – Esquema de deslize das camadas constituintes da via-férrea (ERRI, 1999)

4.3.4. COLAPSO DAS SUBCAMADAS DA VIA

Este fenómeno ocorre fundamentalmente nas zonas de transição junto à estrutura. Se a drenagem não for adequada pode ocorrer este fenómeno, mas não só, pois as cargas provocadas pela circulação dos comboios também poderão levar ao colapso das subcamadas da via por corte progressivo, existindo a possibilidade de este ocorrer pela excessiva deformação plástica do solo, sendo este constituído essencialmente por partículas finas.

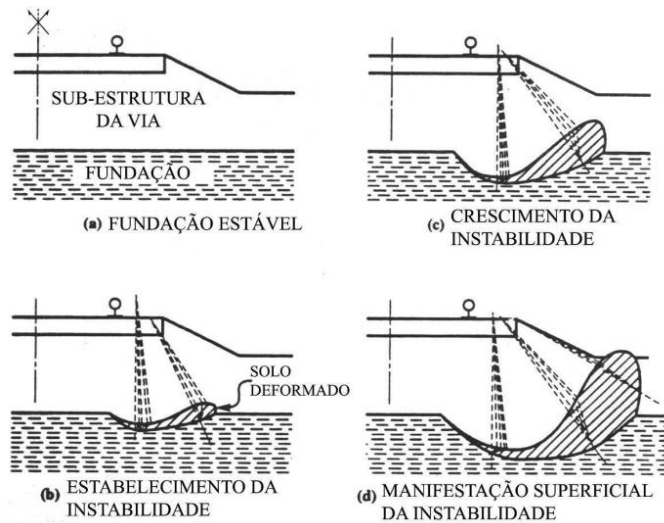


Fig. 39 – Desenvolvimento da rotura por corte progressivo na fundação (Fortunato, 2006)

4.4. NORMAS E RECOMENDAÇÕES RELATIVAS À GEOTECNIA

4.4.1. ASPECTOS RELATIVOS À CONSTRUÇÃO E À GEOMETRIA DOS ATERROS

A geometria dos aterros tem sofrido alterações ao longo do tempo, sendo que os aterros mais antigos apresentam características diferentes dos que se constroem quando se trata de uma nova linha. De acordo com o ERRI, (1999) as vias férreas construídas actualmente possuem uma largura do topo do aterro entre os 6 e os 7 metros para uma via. E a inclinação adoptada para o talude de aterro depende do material utilizado na sua construção, mas normalmente é adoptado 1:1,5. Esta inclinação pode aumentar se utilizarmos um material tratado ou quando se adopta um sistema de reforço do solo.

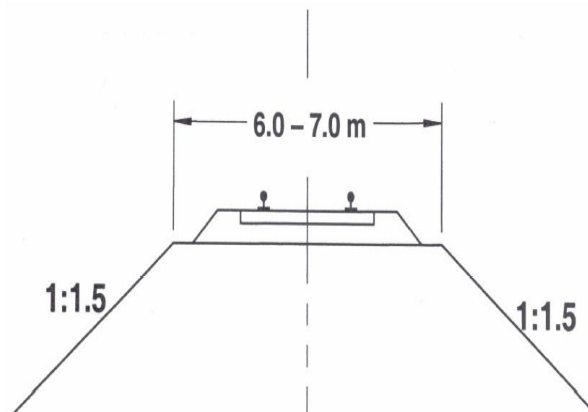


Fig. 40 – Perfil tipo de um aterro recentemente construído numa zona de transição (ERRI, 1999)

No caso de uma via-férrea já construída, as dimensões adoptadas no aterro são ligeiramente diferentes. Neste caso e para uma só via as dimensões da parte superior do aterro variam entre os 4,8 e os 6,0 metros, as inclinações adoptadas para estes taludes são superiores aos das novas linhas ferroviárias, variando normalmente entre 1:1,5 e 1:1,2 e podendo mesmo atingir os valores do ângulo de atrito do solo utilizado na construção do aterro.

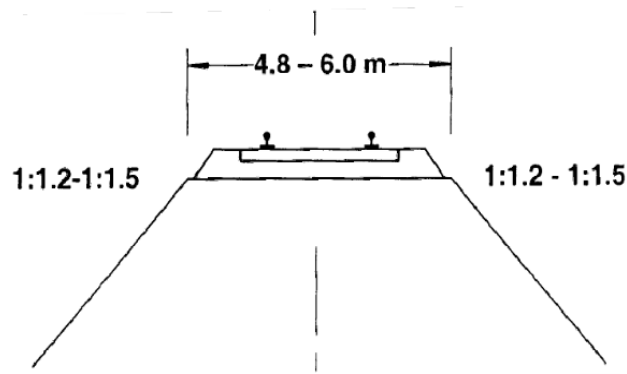


Fig. 41 – Perfil tipo de um aterro numa zona de transição de uma via-férrea mais antiquada (ERRI, 1999)

4.4.2. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

A construção de uma nova via-férrea é cada vez mais controlada, pois cada vez mais se institui a qualidade de construção por forma a manter a segurança da via assim como a comodidade. Na construção de uma linha é necessário proceder à realização de um estudo preliminar geológico e geotécnico, complementado por uma investigação geotécnica que inclui trabalho de campo e de laboratório.

Hoje em dia existe um sistema de classificação dos solos que tem em conta a qualidade dos solos, o seu estado hídrico e as condições hidrogeológicas e hidrológicas do local. A ficha 719R (UIC, 2008), classifica os solos em quatro categorias:

- QS0, solos impróprios, que necessitam de tratamentos especiais;
- QS1, solos medíocres, mas aceitáveis quando sujeitos a uma drenagem adequada;
- QS2, solos medianos;
- QS3, solos bons.

De acordo com a classificação adoptada para os solos que constituem o aterro e a fundação, pode-se dividir a plataforma da via-férrea em função da sua capacidade de suporte:

- PS1, capacidade pobre;
- PS2, capacidade mediana;
- PS3, boa capacidade de suporte.

4.4.3. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS A UTILIZAR NA CONSTRUÇÃO DO ATERRO

Na construção do aterro os materiais mais apropriados são as areias grossas limpas e cascalhos. Os aterros são construídos normalmente com matérias que provem de zonas de empréstimo próximas da obra, isto por razões económicas. Posto isto por vezes os materiais utilizados não são os mais indicados, podendo encontrar-se areias argilosas na constituição de um aterro. Se tal se suceder é necessário controlar a infiltração de água no corpo do aterro através de uma boa drenagem para evitar excessivas deformações. Apesar de se poderem utilizar areias argilosas não é possível utilizar argilas saturadas, rochas ou solos solúveis em água, solos expansivos e susceptíveis às acções de gelo/degelo.

Os materiais utilizados na construção do aterro devem ser devidamente compactados de forma a evitar assentamentos excessivos, proteger o aterro da infiltração de água, garantir a estabilidade da plataforma e evitar o aumento dos trabalhos de manutenção da via. Se o aterro for mal compactado

podem surgir vários problemas como riscos de liquefacção dos solos arenosos durante os carregamentos cíclicos e dinâmicos, risco de amolecimento dos solos coesivos com a presença de água. Para evitar estes problemas são garantidos graus de compactação mínimos nos aterros que variam consoante a importância da obra e cargas previstas. Normalmente o grau de compactação para o corpo do aterro deve ser de 95% do peso volúmico seco máximo determinado de acordo com o ensaio Proctor, e 100% para a camada de leito do aterro. Quanto às dimensões das partículas constituintes do aterro, não devem ter um diâmetro superior a 600 mm e deve ser inferior a metade da espessura da camada a compactar (ERRI, 1999).

Os modelos de deformabilidade do aterro também devem cumprir os valores mínimos de EV_2 previstos na ficha 719R (UIC, 2008). Estes são de 80MN/m^2 para a camada de leito, para o corpo do aterro o EV_2 é igual a 45MN/m^2 para solos finos, e 60MN/m^2 para solos granulares.

4.4.4. LIMITAÇÃO DOS ASSENTAMENTOS

Os assentamentos devem ser limitados de modo a garantir o bom funcionamento da via. Não existe uma regulamentação específica que estipule quais os limites para os assentamentos, a maioria dos regulamentos estipula assentamentos limite iguais para as diferentes zonas da via em função da velocidade de projecto. O ERRI (1999) apresenta um exemplo do caso das normas suecas em vigor nas vias-férreas. Nestas os assentamentos totais máximos são limitados em função da velocidade de projecto a 300 mm, para 100 km/h, e até 100 mm para 350 km/h. Os assentamentos diferenciais máximos, dependem da velocidade praticada e do comprimento da via, e os limites podem variar entre 4 cm/10 m e 30 cm/30 m, para uma velocidade máxima de 100 km/h, até 2 cm/50 m e 10 cm/110m para uma velocidade máxima de 350 km/h (ERRI, 1999).

4.5. SOLUÇÃO A ADOPTAR EM ZONAS DE TRANSIÇÃO

4.5.1. CUNHAS DE TRANSIÇÃO

Esta solução surgiu pela necessidade de assegurar uma variação gradual de rigidez entre o aterro e a estrutura, para garantir que a via mantenha todas as características iniciais num maior período de tempo.

Esta zona deve ser construída com especial atenção para a compactação, e para os materiais utilizados na sua construção que são materiais granulares ou granulares tratados com cimento. A ficha 719R (UIC, 2008) considera que a cunha de transição deve ter pelo menos 20 m, medidos a partir da extremidade do encontro da estrutura, ou 10 m dos muros-ala, e nunca inferior à altura da camada de aterro. O dimensionamento desta zona deve ter em consideração vários aspectos como o tipo e geometria da estrutura, velocidade de circulação, altura do aterro, processo construtivo, perfil real do terreno na zona de transição, e limite dos assentamentos diferenciais que vão condicionar a solução a escolher para a zona de transição.

As zonas de transição apresentam ligeiras diferenças de país para país, pois os materiais utilizados assim como a sua localização na transição é muito semelhante.

4.5.1.1. CUNHAS DE TRANSIÇÃO UTILIZADAS PELA ADIF

Em Espanha as normas da ADIF, (2006) consideram que as zonas de transição devem ser construídas adoptando materiais granulares (MG) e materiais granulares tratados (MT). Só se utiliza material granular tratado (MT) quando a altura de recobrimento sobre a estrutura é pequena, ou seja $0 \leq H \leq 0,5 \text{ m}$.

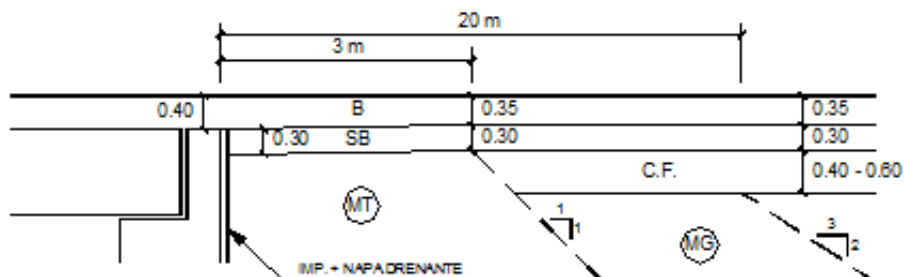


Fig. 42 – Pormenor da solução de transição para $H=0$ m (adaptado de (ADIF, 2006))

Nesta norma são abordados dois casos gerais (I e II), de execução de cunhas de transição. O caso I estipula a construção da estrutura e da cunha de transição antes de ser construído o aterro, sendo este o mais comum. No caso II as cunhas de transição são construídas após a construção do aterro adjacente à estrutura. Este só se aplica normalmente em situações que seja necessário consolidar os terrenos naturais, recorrendo a pré-carga e a drenos verticais por exemplo.

No que diz respeito ao caso I, que é o caso abordado neste estudo, podem-se destacar algumas especificações em função da altura de recobrimento (H) (Quadro 2).

Quadro 2 – Características do caso I em função das alturas de recobrimento

Altura de Recobrimento (m)	Material utilizado	Inclinação das camadas
$H > 2$	Material granular	3/2
$0,5 < H < 2$	Material granular	3/2
$0 < H < 0,5$	Material tratado	1/1
	Material granular	3/2
$H = 0$	Material tratado	1/1
	Material granular	3/2

É de salientar que o material tratado (MT) deve ter 3% de cimento, envolvendo toda a estrutura no caso da altura de recobrimento estar entre 0 e 0,5 metros (Fig. 43 c)), quando a altura é nula (Fig. 43 d)) o material tratado apenas se localiza em ambos os lados da estrutura. A utilização deste material é justificada pelo aumento do efeitos dinâmicos, devido à altura de recobrimento muito reduzida.

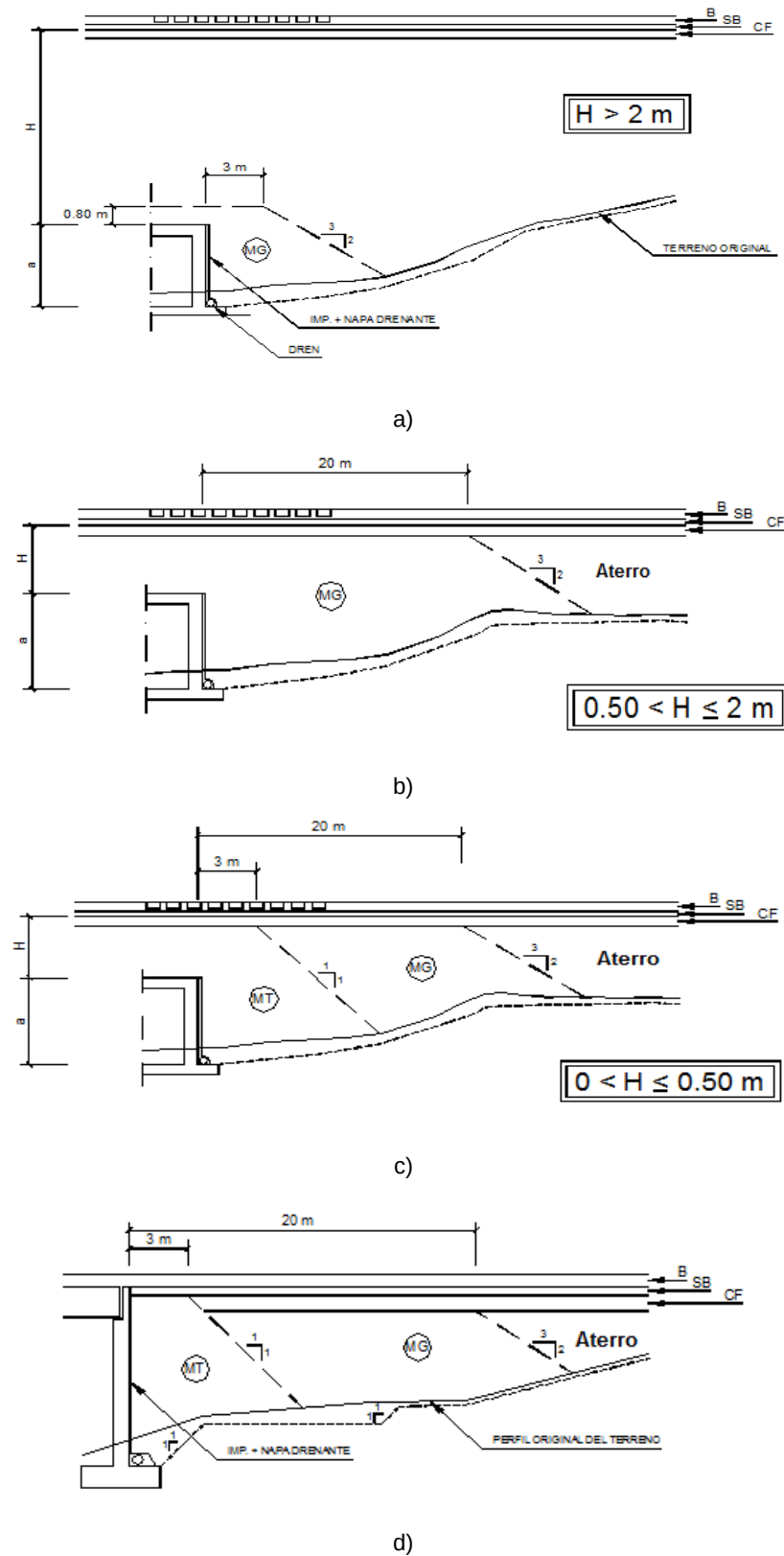


Fig. 43 – Cunhas de transição utilizadas pela ADIF para o caso I, com alturas de recobrimento variáveis: a) $H > 2$ m b) $0,5 < H < 2 \text{ m}$ c) $0 < H < 0,5 \text{ m}$ d) $H=0 \text{ m}$ (adaptado de (ADIF, 2006))

4.5.1.2. CUNHAS DE TRANSIÇÃO UTILIZADAS PELA SNCF

Em França consideram-se também cunhas de transição entre o aterro e a estrutura. As normas da SNCF, (2002) consideram tal como em Espanha cunhas de material tratado com cimento (G.T.) e material granular não tratado (G.N.T.).

Os materiais utilizados para o material tratado com cimento (G.T.) devem ter uma dimensão máxima de 31,5 mm, com uma dosagem de cimento de 3%.

Podem-se destacar diferentes soluções em função das alturas de aterro, para uma altura de recobrimento ente 0,10 e 0,30 m e entre 0,30 e 0,70 m (Quadro 3).

Quadro 3 – Características das diversas zonas de transição adoptadas pela (SNCF, 2002)

Altura de aterro (m)	Altura de Recobrimento (m)	Material utilizado	Inclinação das camadas	Altura do material tratado (m)
$H \geq 4$		Material granular	3/2	3
		Material tratado	1/1	
$3 < H < 4$	$0,10 < E_R < 0,30$	Material granular	3/2	H
	$0,30 < E_R < 0,70$	Material tratado		
$H < 3$		Material tratado	3/2	3
		Material granular	1/1	

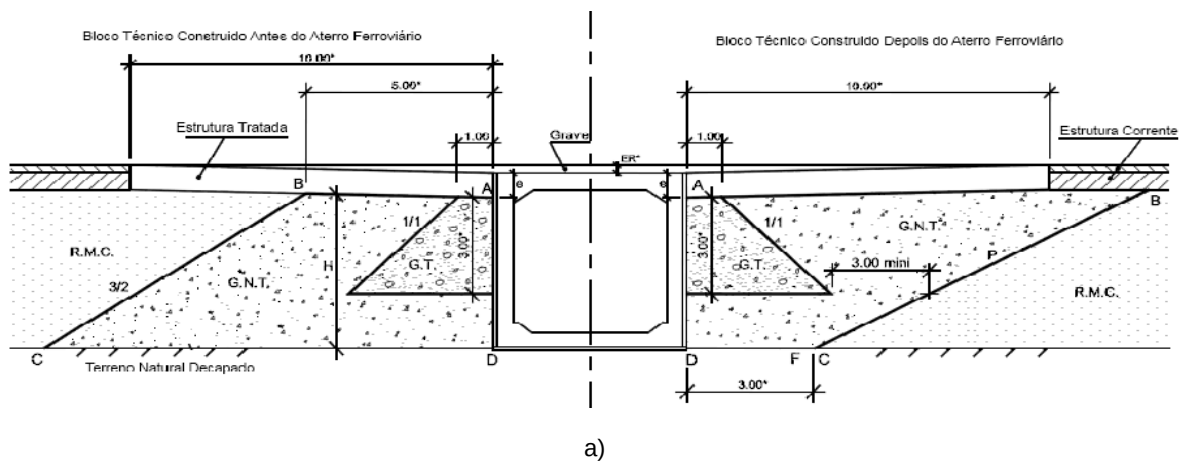


Fig. 44 – Esquema de transição entre o aterro e a estrutura para uma altura de recobrimento entre 0,10 e 0,30 m e entre 0,30 e 0,70, com H variável: a) $H \geq 4$ m b) $3 < H < 4$ m c) $H < 3$ m (adaptado de (SNCF, 2002))

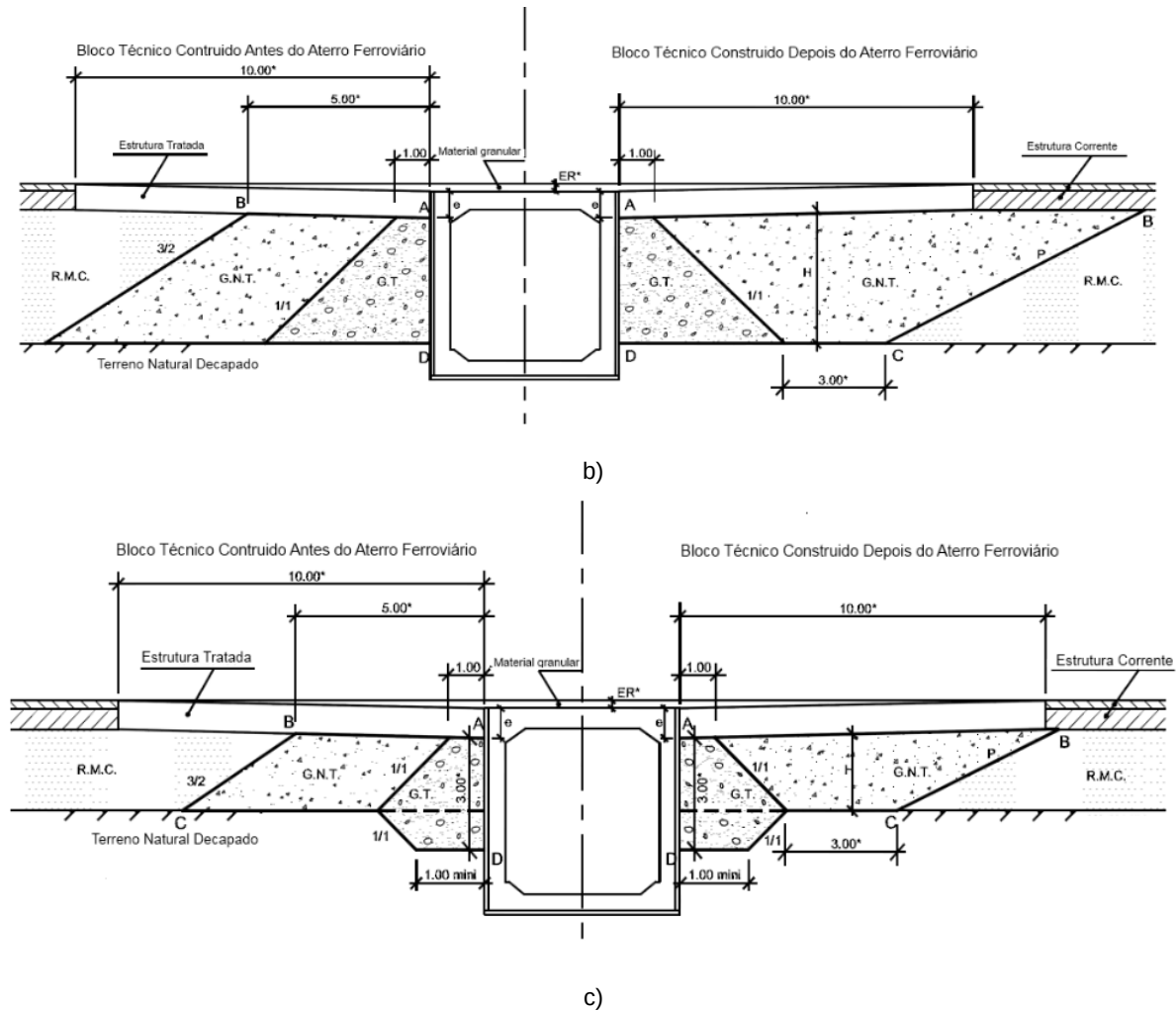


Fig. 44 – Esquema de transição entre o aterro e a estrutura para uma altura de recobrimento entre 0,10 e 0,30 m e entre 0,30 e 0,70, com H variável: a) $H \geq 4$ m b) $3 < H < 4$ m c) $H < 3$ m (adaptado de (SNCF, 2002)) (continuação)

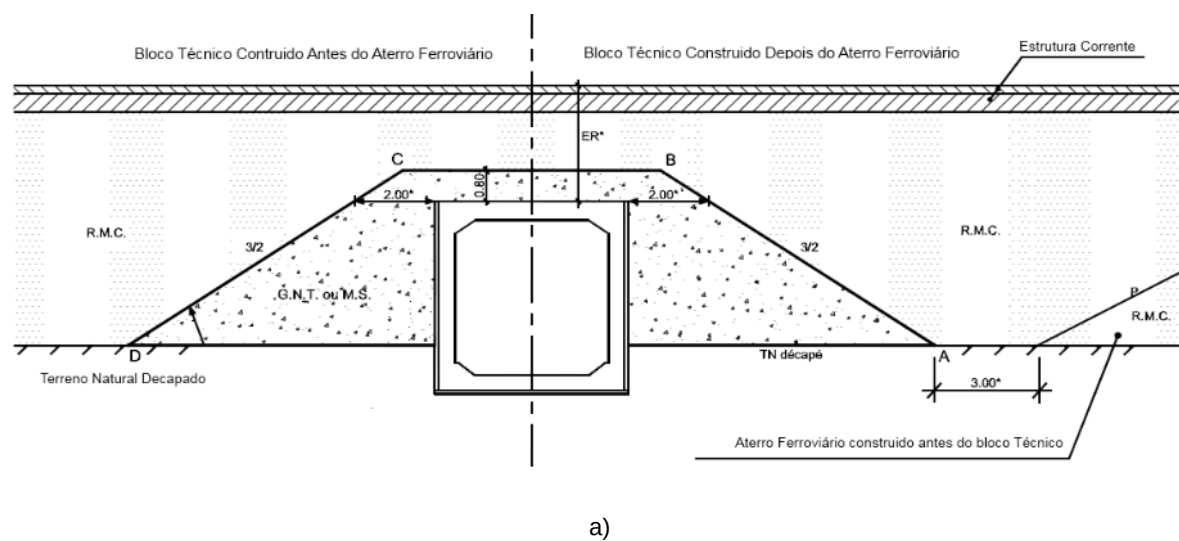


Fig. 45 – Esquema de transição entre o aterro e a estrutura: a) $0,70 < E_R < 1,20$ m b) $E_R > 2$ m (adaptado de (SNCF, 2002))

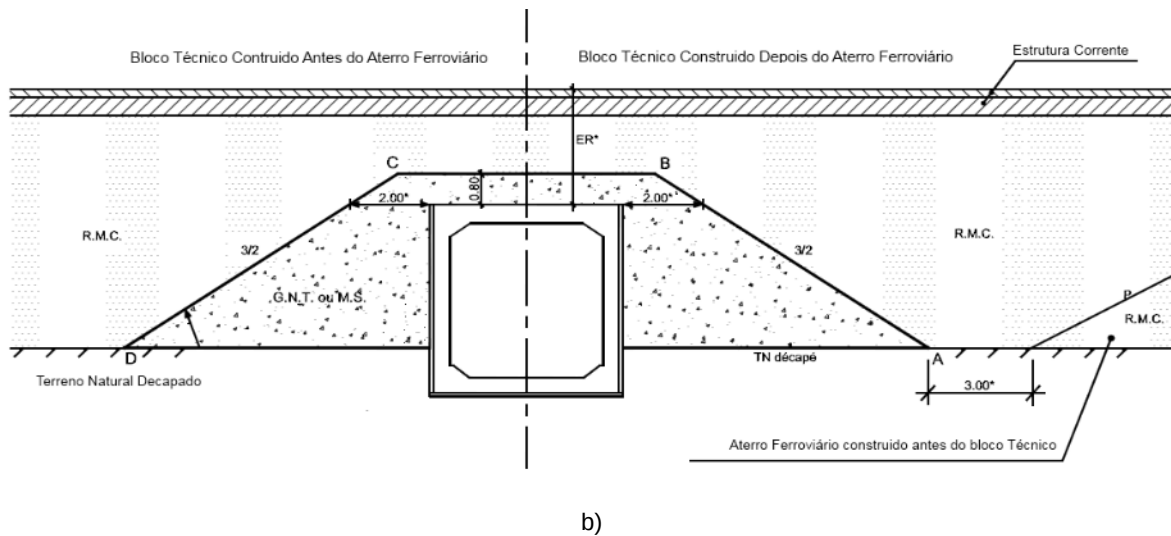


Fig. 45 – Esquema de transição entre o aterro e a estrutura: a) $0,70 < E_R < 1,20$ m b) $E_R > 2$ m (adaptado de (SNCF, 2002)) (continuação)

4.5.2. OUTRAS SOLUÇÕES

4.5.2.1. RECURSO A MATERIAIS RESILIENTES

Com o aumento das velocidades de circulação as vias férreas estão sujeitas a maiores esforços. Logo surgiu necessidade de dotar a via de uma maior elasticidade, recorrendo a materiais com propriedades resilientes, para melhorar o seu comportamento a acções dinâmicas. Estes são materializados pelas palmilhas sob os carris, sob as travessas e por mantas resilientes sob a camada de balastro. A inclusão destes materiais na via-férrea tem como finalidade que os custos de manutenção diminuam e que haja uma melhor redistribuição de esforços que irão ser transmitidos às camadas inferiores.

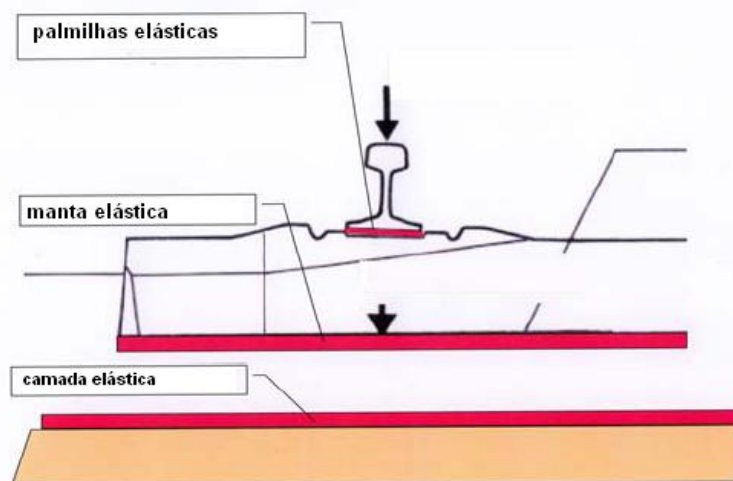


Fig. 46 – Elementos resilientes que se podem aplicar na via-férrea (adaptado de (Leykauf, 2006))

Destas opções apresentadas a utilização de uma camada resiliente sob o balastro apresenta-se como a mais eficaz, pois abrange uma maior área, conferindo-lhe boas características elásticas. Esta solução é adoptada na Alemanha em linhas de alta velocidade, em estruturas com via balastrada, com o objectivo de minorar os assentamentos do balastro no encontro da estrutura, tendo esta manta uma extensão de cerca de 15 m em aterro até ao encontro.

Estas mantas devem ter uma boa resistência às pressões de contacto, por forma a resistir ao contacto com a camada de balastro que é constituído por um agregado grosso mal graduado. A aplicação de palmilhas sob os carris é uma solução mais económica pois podem-se substituir as já existentes, mas a sua elasticidade deve ser limitada para evitar excessivas pressões sobre o carril.

4.5.2.2. MELHORAMENTO DAS TRAVESSAS EM VIA BALASTRADA

O melhoramento das travessas visa diminuir a pressão sobre o balastro, logo o seu assentamento. Este melhoramento é materializado pelo alargamento de travessas, que consiste na utilização de travessas mais robustas com um peso de ~560 kg, 2,40 m de comprimento e uma largura de 0,57 m espaçadas de 0,60 m.

Deste modo a pressão transmitida ao balastro será muito menor, para comprovar isso temos o exemplo de uma carga por eixo de 22,5t que transmite ao balastro uma pressão de 2 kg/cm^2 enquanto numa travessa tradicional seria de $3,7 \text{ kg/cm}^2$.



Fig. 47 – Reforço de travessas (Couto, 2008)

Por forma a melhorar a distribuição de cargas são hoje em dia utilizadas estruturas do tipo “Frame-Sleeper” (longarina-travessa), com um comprimento de 2,40 m, largura de 0,95 m, e com dois pontos de fixação por elemento. Assim a distribuição de carga combinada entre as vigas longitudinais e as transversais é transmitida ao balastro de forma contínua, reduzindo a pressão na parte inferior da travessa. Mas este tipo de estrutura também permite aumentar a resistência lateral da via assim como manter o seu alinhamento, permitindo uma maior durabilidade da geometria da via (Couto, 2008).



Fig. 48 – Estruturas "Frame sleeper" (Couto, 2008)

4.5.2.2 AUMENTO DE RIGIDEZ DA VIA

As zonas de transição têm acentuadas variações de rigidez como se pode observar na Fig. 49. O aumento de rigidez da via na parte do aterro tem como principal objectivo suavizar esta diferença, de modo a que os efeitos dinâmicos sobre a estrutura e os assentamentos diminuam.

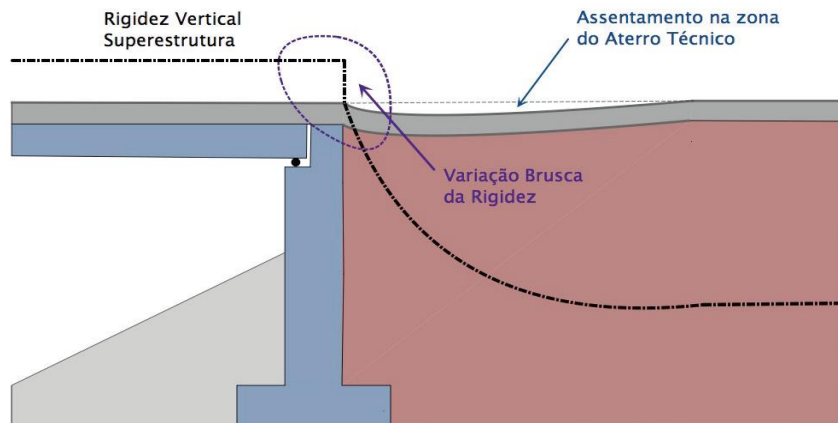


Fig. 49 – Variação de rigidez vertical na zona de transição (Coelho, 2008)

Este aumento de rigidez pode ser conseguido pela colocação de travessas com maiores dimensões, em que o comprimento das mesmas vai aumentando gradualmente ao longo da zona de transição, como se pode verificar na Fig. 50, ou pela instalação de um conjunto de carris extra ao longo da zona de transição, unidos por travessas devidamente preparadas para este tipo de solução (Fig. 51).

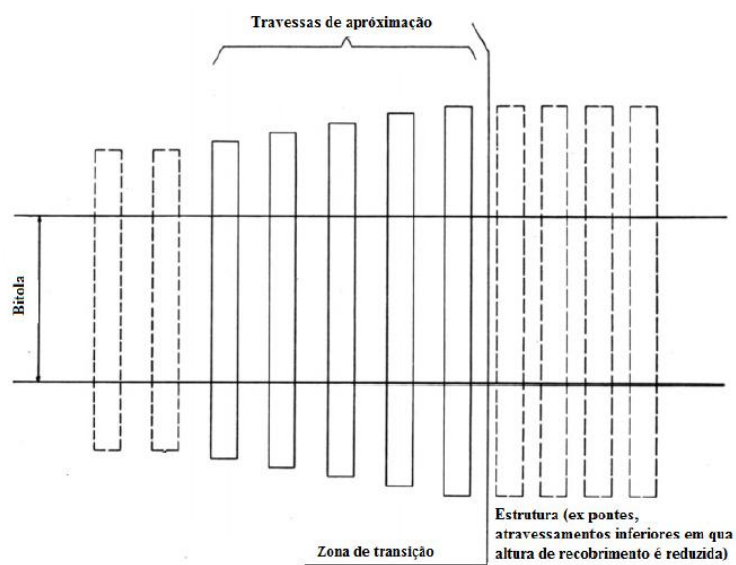


Fig. 50 – Travessas de aproximação (Nóbrega, 2010)



Fig. 51 – Carris extra ao longo da zona de transição (Nóbrega, 2010)

5

MODELAÇÃO DA ESTRUTURA E ATERROS ADJACENTES

5.1. INTRODUÇÃO

Com o grande desenvolvimento que se tem verificado nas vias férreas europeias nos últimos anos surgiu a necessidade de aumentar as velocidades de circulação, nas novas vias assim como nas já existentes. Deste modo as linhas férreas começam a estar sujeitas a grandes cargas dinâmicas que devem ser analisadas cuidadosamente, pois estas condicionam o bom funcionamento da estrutura.

Para analisar os efeitos dinâmicos transmitidos às passagens inferiores do tipo box culvert a linhas de alta velocidade pelos comboios foi utilizado o programa de cálculo comercial ANSYS®. Esta modelação pretende ser o mais realista possível, analisando o comportamento dinâmico da estrutura, mas para tal devemos ter em consideração as características do comboio, e da via. No caso dos comboios, o comprimento total, o afastamento entre eixos, e as cargas por eixo. No desenvolvimento deste capítulo serão apresentadas as características dos comboios utilizados assim como as diversas propriedades do solo e da estrutura.

As opções tomadas durante a modelação 2D do modelo, como elementos utilizados, descretização da malha, e condições de apoio também são apresentadas em seguida.

5.2. ANÁLISE DINÂMICA E MODELOS DE CARGA UTILIZADOS - NORMA EN 1991-2, (2003)

Apesar do objectivo deste trabalho consistir numa análise dinâmica de um atravessamento inferior, existe legislação que impõe a necessidade de executar uma análise dinâmica em determinadas circunstâncias. Estas são apresentadas sob a forma de um fluxograma de apoio à decisão (Fig. 52), que tem em consideração o tipo de estrutura, do vão e de algumas propriedades dinâmicas. Os resultados provenientes das análises dinâmicas devem ser tomados em conta no dimensionamento da estrutura e nas verificações de segurança da via e dos passageiros. A seguir são apresentadas todas as propriedades de que depende o fluxograma para decidir qual a análise a adoptar (Figueiredo, 2009).

- Velocidade máxima de circulação (V) em km/h;
- Vão (L) da estrutura em metros;
- Simplicidade da estrutura;
- Frequência natural (em Hz) correspondente ao 1º modo de flexão vertical (n_0);
- Frequência natural (em Hz) correspondente ao 1º modo de torção (n_0).

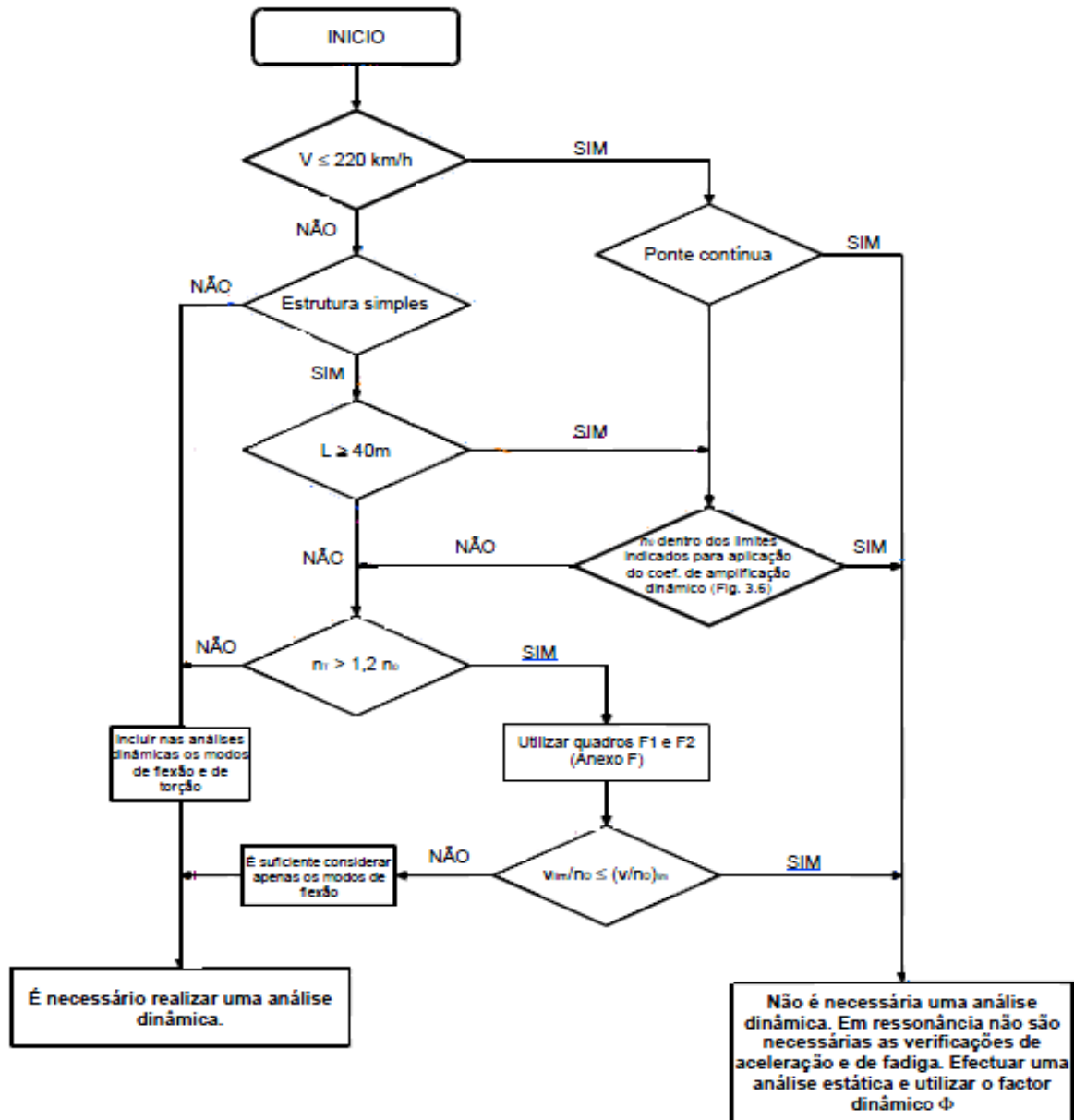


Fig. 52 – Fluxograma de apoio à decisão de realização de uma análise dinâmica de uma estrutura (adaptado de (EN1991-2, 2003))

No estudo desenvolvido são utilizados vários comboios com diferentes características, pois com o conceito de interoperabilidade europeu surgiu esta necessidade. Este conceito visa existirem linhas de alta velocidade com características técnicas, que permitam que qualquer comboio de alta velocidade europeu possa circular nessa linha.

Visto que os diversos comboios comerciais têm diferentes características como massa, distância entre eixos e comprimento, é necessário fazer uma análise dinâmica mais abrangente. Apesar de estarmos a falar de comboios comerciais diferentes, não são estes que vão ser utilizados no estudo em causa. Pois a norma EN 1991-2, (2003) especifica os modelos de carga HSLM para uma análise dinâmica, sendo que estes abrangem todos os modelos de comboios existentes.

5.2.1. COMBOIOS COMERCIAIS

A título de curiosidade são apresentados em seguida alguns modelos dos comboios comerciais a circular actualmente na Europa. É de notar que estes comboios se dividem em três classes distintas, os articulados, os convencionais e os regulares. No quadro seguinte são apresentadas as características das diferentes classes e esquemas das mesmas.

Quadro 4 – Características das diferentes classes (EN1991-2, 2003)

Tipo de comboio	Força por eixo P [kN]	Comprimento das carruagens D [m]
Articulado	170	$18 \leq D \leq 27$
Convencional	> 170 ou o valor da equação (5.1)	$18 \leq D \leq 27$
Regular	170	$10 \leq D \leq 14$

$$4P \cos\left(\frac{\pi d_{BS}}{D}\right) \cos\left(\frac{\pi d_{BA}}{D}\right) \leq 2P_{HSLMA} \cos\left(\frac{\pi d_{HSLMA}}{D_{HSLMA}}\right) \quad (5.1)$$

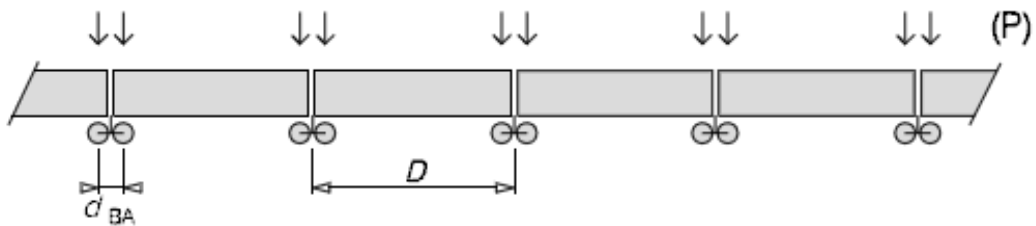


Fig. 53 – Modelo de comboio articulado (EN1991-2, 2003)

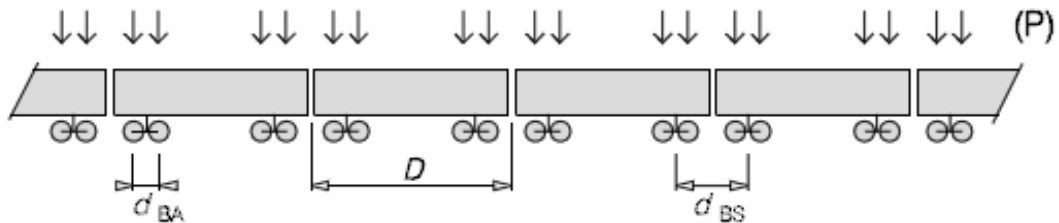


Fig. 54 – Modelo de comboio convencional (EN1991-2, 2003)

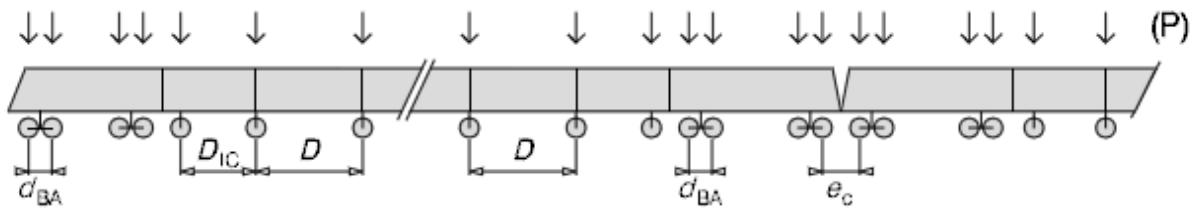


Fig. 55 – Modelo de comboio regular (EN1991-2, 2003)

Depois de analisados os esquemas anteriores podemos associar a cada classe alguns modelos comerciais bem conhecidos.

Como exemplos dos comboios articulados (Fig. 53) temos o Thalys, o Eurostar, o TGV (Fig. 56 a)) e o AGV. Esta classe de comboios distingue-se das restantes pelo facto de possuir apenas um bogie com dois eixos localizados na zona de separação das carruagens. Os comboios convencionais (Fig. 54) possuem dois bogies com dois eixos cada um por carruagem, tendo como exemplares o ICE-2 (Fig. 56 b)) e o ETR-Y. Por fim os comboios regulares, (Fig. 55) que tem também características específicas, pois possuem apenas um eixo nas ligações entre carruagens. O modelo do comboio regular é utilizado no caso do Talgo-350 (Fig. 56 c)).

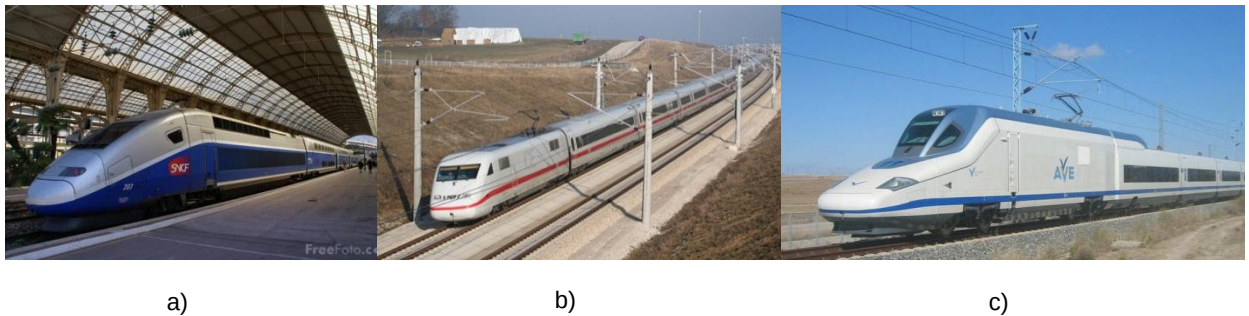


Fig. 56 – Modelos de alguns comboios comerciais: a) TGV – atlantique (FreeFoto.com, 2011) b) ICE – 2 (Wordpress, 2011) c) Talgo – 350 (Wikipédia, 2011)

5.2.2. MODELOS DE CARGA DINÂMICOS

Como foi referido anteriormente existem modelos de carga que estão definidos na norma EN 1991-2, (2003), que são conhecidos como HSLM (High Speed Load Model). Estes foram criados com o propósito de cobrirem as características de todos os comboios reais a operar na actualidade e no futuro. Deste modo quando se dimensiona uma via com o conceito de interoperabilidade, a estrutura deve estar sujeita à passagem destes modelos, por forma a abranger todos os efeitos dinâmicos que possam ser provocados pelos comboios reais. É de notar que cada um deles tem dimensões e cargas por eixo variáveis, representando as várias classes de comboios.

Os modelos HSLM estão divididos em HSLM-A e HSLM-B. Os modelos HSLM-A (Fig. 57) estão divididos em 10 esquemas de carga, que se fundamentam num comboio articulado. As características dos 10 esquemas de carga estão representadas no Quadro 5. Estes diferem de um esquema para outro, no número de carruagens (N), comprimento das carruagens (D), espaçamento entre eixos dos bogies (d), e forças por eixo (P).

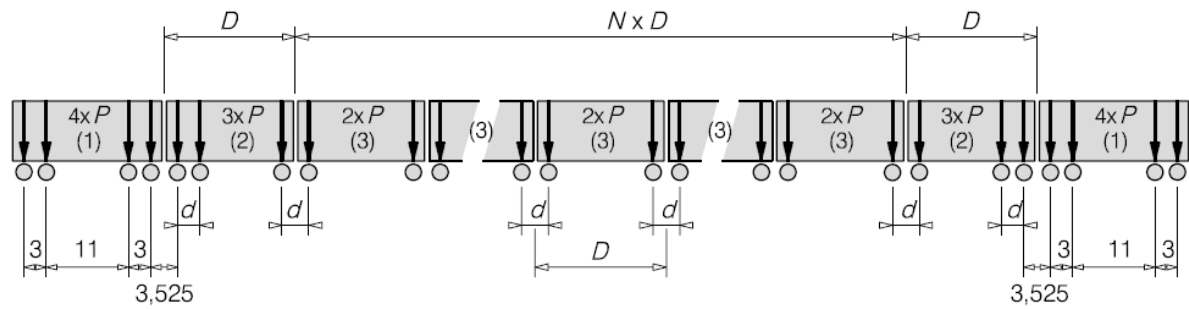


Fig. 57 – Configuração genérica do modelo de carga HSLM-A (EN1991-2, 2003)

Quadro 5 – Características do esquema de carga HSLM-A (EN1991-2, 2003)

Comboio Universal	Número de carruagens intermédias N	Comprimento da carruagem D [m]	Espaçamento entre eixos dos bogies d [m]	Força por eixo P [kN]
A1	18	18	2,0	170
A2	17	19	3,5	200
A3	16	20	2,0	180
A4	15	21	3,0	190
A5	14	22	2,0	170
A6	13	23	2,0	180
A7	13	24	2,0	190
A8	12	25	2,5	190
A9	11	26	2,0	210
A10	11	27	2,0	210

Os modelos HSLM-B (Fig. 58) são constituídos por um número de cargas (N) com um valor de 170 kN, espaçadas entre si de (d). Os parâmetros (N) e (d) são obtidos a partir do diagrama (Fig. 59) fornecido na norma EN 1991-2, (2003), em função do vão da estrutura (L). Este modelo surgiu porque em estruturas com vãos inferiores a 7 metros, os comprimentos de onda condicionantes não são os das carruagens (D), mas sim o correspondente à distância entre eixos de um bogie (d).

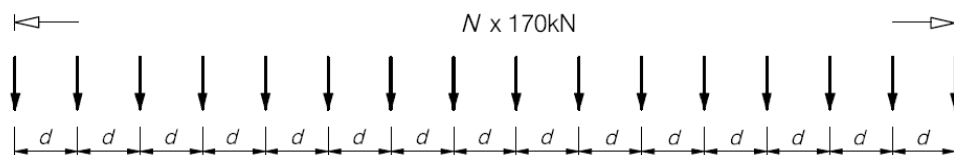


Fig. 58 – Configuração genérica do modelo HSLM-B (EN1991-2, 2003)

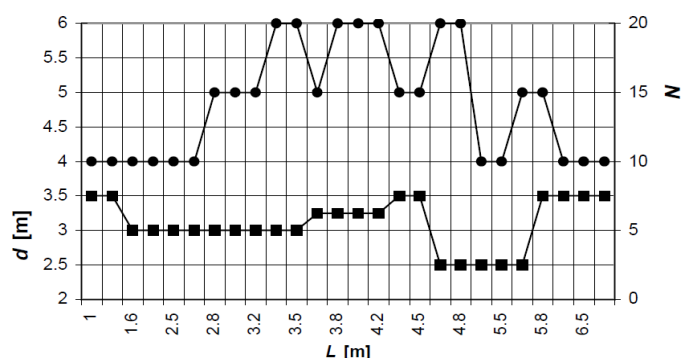


Fig. 59 – Diagrama de parâmetros do modelo HSLM-B (EN1991-2, 2003)

Cada um dos modelos deve ser empregue em situações específicas, como está representado no Quadro 6. De uma forma geral o modelo HSLM-A é aplicado em todas as estruturas com vãos maiores que 7 metros simplesmente apoiados, em estruturas com vãos contínuos ou complexas com vãos inferiores a 7 metros. O modelo HSLM-B deve ser aplicado quando as estruturas têm vãos inferiores a 7 metros simplesmente apoiados.

Quadro 6 – Condições de aplicação dos modelos HSLM (EN1991-2, 2003)

Esquema estrutural	$L < 7\text{m}$	$L \geq 7\text{m}$
Vão simplesmente apoiado ^a	HSLM – B ^b	HSLM – A ^c
Estrutura contínua ^a	HSLM – A ^d	HSLM – A ^d
ou	Comboios de A1	Comboios de A1
Estrutura complexa ^e	a A10 inclusive	a A10 inclusive

^a Válido para pontes simplesmente apoiadas, que possam ser representadas pelo seu eixo longitudinal ou laje, onde os efeitos devido aos apoios enviesados sejam desprezados;

^b Para tramos simplesmente apoiados com vão até 7 metros, considerando apenas a passagem de um comboio crítico do modelo carga de acordo com 6.4.6.1.1 (5);

^c Para tramos simplesmente apoiados com comprimento maior ou igual a 7 metros, apenas se considera um único comboio crítico do modelo HSLM – A , de acordo com o Anexo E (em alternativa podem utilizar-se todos os comboios do modelo HSLM – A);

^d Todos os comboios do modelo HSLM – A devem ser utilizados no dimensionamento;

^e Para estruturas que não cumpram a nota (a), por exemplo estruturas com apoios enviesados, pontes em que a torção seja significativa. Para estruturas complexas deve ser utilizado também o modelo HSLM – B;

5.3. ANÁLISE DINÂMICA SEM INTERACÇÃO VEÍCULO - ESTRUTURA

A análise dinâmica de uma estrutura devido à passagem de um comboio deve considerar os efeitos de cargas móveis, sobre uma estrutura imóvel, no caso em estudo a box culvert. Nas análises dinâmicas podem ser abordadas diversas metodologias do sistema estrutura-comboio, como analíticas, numéricas, simplificadas e empíricas.

Na análise efectuada foi utilizada uma metodologia numérica, baseada no método dos elementos finitos. Tendo como vantagem avaliar o comportamento dinâmico de estruturas e problemas complexos, e como desvantagem o tempo de cálculo que é necessário empregar neste tipo de cálculo.

Nesta metodologia numérica foi abordado o sistema de interacção estrutura-comboio que é traduzido por um conjunto de cargas em movimento, com distâncias entre si pré-definidas (Ribeiro, 2004).

5.3.1. EQUAÇÃO DE EQUILÍBRIO DINÂMICO

As equações de equilíbrio dinâmico traduzem o equilíbrio das forças em cada ponto e em cada instante de tempo, o equilíbrio é conseguido através da seguinte equação:

$$f_i(t) + f_c(t) + f_e(t) = f(t) \quad (5.2)$$

Esta equação, define em cada ponto para cada instante de tempo quatro tipos de forças: forças exteriores ($f(t)$); forças de inércia ($f_i(t)$); forças de amortecimento ($f_c(t)$); forças elásticas ($f_e(t)$). Cada uma destas forças é obtida através das seguintes equações:

$$f_i(t) = M \ddot{u} \quad (5.3)$$

$$f_c(t) = C \dot{u} \quad (5.4)$$

$$f_e(t) = K u \quad (5.5)$$

Através da equação (5.3) é obtida a força de inércia em que M , é a matriz de massa, e $\ddot{u}$ o vector das acelerações para cada instante. A equação (5.4) representa a força de amortecimento, em que C retrata a matriz de amortecimento e $\dot{u}$ é a velocidade. E por fim a equação (5.5), que representa a força elástica. Esta força é obtida através da matriz rigidez K pelo vector deslocamento u . Logo a equação (5.2) pode ser reescrita, em função das grandezas apresentadas nas equações (5.3), (5.4) e (5.5).

$$M \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + K u = f(t) \quad (5.6)$$

No trabalho desenvolvido foi adoptada a matriz de amortecimento de Rayleigh, expressa como uma combinação linear de matrizes de massa e rigidez (Chopra, 1995):

$$C = a_0 M + a_1 K \quad (5.7)$$

em que a_0 e a_1 são as constantes de amortecimento de Rayleigh, que podem ser calculadas através das expressões seguintes, (Chopra, 1995):

$$a_0 = \xi \frac{2\omega_i \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (5.8)$$

$$a_1 = \xi \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (5.9)$$

As equações (5.8) e (5.9) nas situações em que se admite o mesmo coeficiente de amortecimento (ξ) para os diferentes modos de vibração i e j .

As expressões (5.8) e (5.9) surgiram a partir das seguintes condições, considerando ξ_n o amortecimento definido por Rayleigh:

- Considerando $C = a_0 M$

$$C_n = \varphi_n^T c \varphi_n \quad (5.10)$$

$$C_n = a_0 \varphi_n^T M \varphi_n \quad (5.11)$$

$$C_n = a_0 M_n \quad (5.12)$$

$$\xi_n = \frac{C_n}{2M_n \omega_n} = \frac{a_0 M_n}{2M_n \omega_n} \quad (5.13)$$

- Considerando $C = a_1 K$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_n}{M_n}} = K_n = \omega_n^2 M_n \quad (5.14)$$

$$C_n = \varphi_n^T C \varphi_n \quad (5.15)$$

$$C_n = a_1 \varphi_n^T K \varphi_n = a_1 K_n \quad (5.16)$$

$$\xi_n = \frac{C_n}{2M_n \omega_n} = \frac{a_1 W_n^2 M_n}{2M_n \omega_n} = \frac{a_1}{2} \omega_n \quad (5.17)$$

Depois destas considerações foi feita a soma entre as equações (5.13) e (5.17) resultando:

$$\xi_n = \frac{a_0}{2\omega_n} + \frac{a_1}{2} \omega_n \quad (5.18)$$

Por análise da equação (5.18), podemos calcular os coeficientes de amortecimento (ξ_i) e (ξ_j) para duas gamas de frequências angulares (ω_i) e (ω_j) diferentes:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_i} & \omega_i \\ \frac{1}{\omega_j} & \omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \xi_i \\ \xi_j \end{Bmatrix} \quad (5.19)$$

Resolvendo o sistema (5.19) apresentado anteriormente, e assumindo que as frequências ω_i e ω_j tem os mesmos coeficientes de amortecimento (ξ), chegamos às constantes de amortecimento a_0 e a_1 (Chopra, 1995).

Concluindo através da Fig. 60 que utilizando o amortecimento $a_1 K$, este aumenta quando a frequência aumenta. Pelo contrário quando se utiliza um amortecimento $a_0 M$, este aumenta com a diminuição da frequência. Através da expressão (5.18) podemos definir as constantes de amortecimento a_0 e a_1 , escolhendo os valores da frequência mínima (ω_i) e máxima (ω_j) que queremos adoptar na nossa análise. É de notar que o amortecimento a adoptar deve cumprir o que é disposto na norma EN 1991-2, (2003), resumido no Quadro 7.

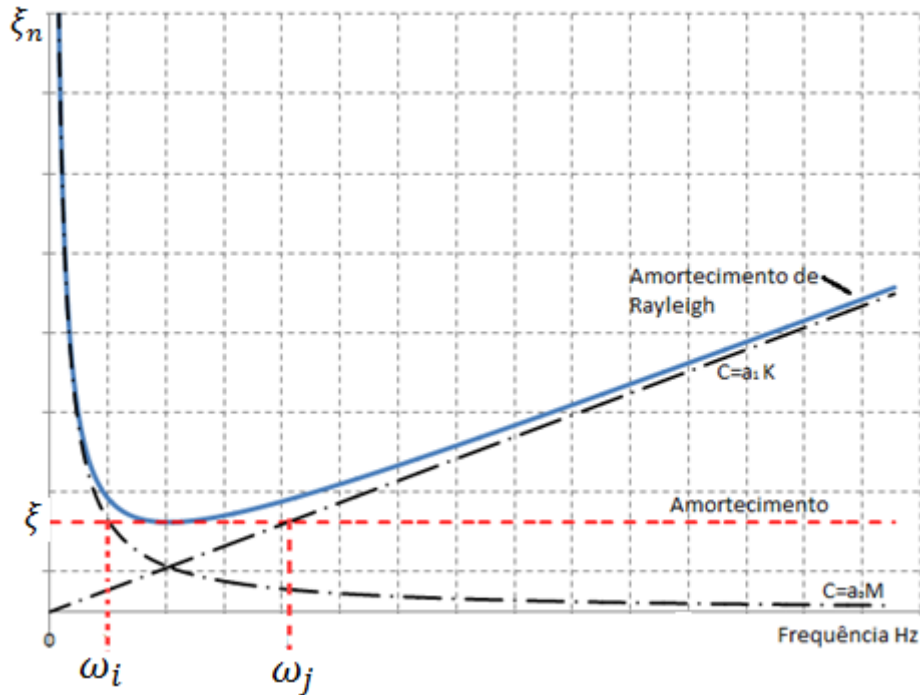


Fig. 60 – Exemplo da relação entre o coeficiente de amortecimento e a frequência

Quadro 7 – Amortecimento estrutural para o cálculo dinâmico (EN1991-2, 2003)

Tipo de ponte	ξ Limite inferior da percentagem de amortecimento (%)	
	Vão L < 20 m	Vão L ≥ 20 m
Aço	$\xi = 0,5 + 0,125 (20 - L)$	$\xi = 0,5$
Betão pré-esforçado	$\xi = 1,0 + 0,07 (20 - L)$	$\xi = 1$
" <i>Filler Beam</i> " e betão armado	$\xi = 1,5 + 0,06 (20 - L)$	$\xi = 1,5$

5.3.2. MODELO COM CARGAS MÓVEIS

Como o próprio nome indica este modelo simplifica o comboio como sendo um conjunto de cargas móveis de valores constantes.

Estas cargas móveis são materializadas por funções de carga temporal nos nós pertencentes ao percurso de cargas. Em cada instante, esta função representa a força nodal equivalente às cargas móveis que percorrem a estrutura (Ribeiro, 2004).

Para determinarmos as funções de carga temporais é necessário definir inicialmente os nós que constituem o percurso de cargas móveis, assim como a posição de cada carga (P_k) em relação ao início do percurso ($x_k(0)$). Este processo de análise deve se repetido para cada comboio, pois no âmbito deste trabalho serão analisados os efeitos dinâmicos provocados por todos os comboios HSLM-A a várias velocidades. Logo para facilitar o processo de análise foram definidas matrizes de carga para cada um dos dez comboios. Cada uma das matrizes é definida por duas colunas, sendo que na primeira coluna se encontram as distâncias entre cada uma das cargas relativamente à primeira, e na segunda os valores de carga em cada um dos eixos (P_k). A localização das cargas móveis ($x_k(t)$) sobre a estrutura num dado instante (t) é conseguida através da soma da posição inicial ($x_k(t_0)$) com o espaço percorrido pelo comboio ($v t$), equação (5.20). Depois de conhecida a localização da carga num dado instante (t), podemos calcular as forças nodais equivalentes (P_i) pela equação (5.21).

$$x_k(t) = x_k(t_0) + v t \quad (5.20)$$

$$P_i = P_k N_i(x_k) \quad (5.21)$$

Na equação (5.21) a parâmetro ($N_i(x_k)$) reproduz uma função para o nó i do caminho de cargas, que é obtida pelo sistema (5.22) apresentado, os termos que se encontram no sistema seguinte, estão representadas na Fig. 61.

$$N_i(x) = \begin{cases} \frac{x_k - x_{i-1}}{L_{i-1,i}} & x_{i-1} \leq x_k \leq x_i \\ 1 - \frac{x_k - x_i}{L_{i,i-1}} & x_i \leq x_k \leq x_{i+1} \end{cases} \quad (5.22)$$

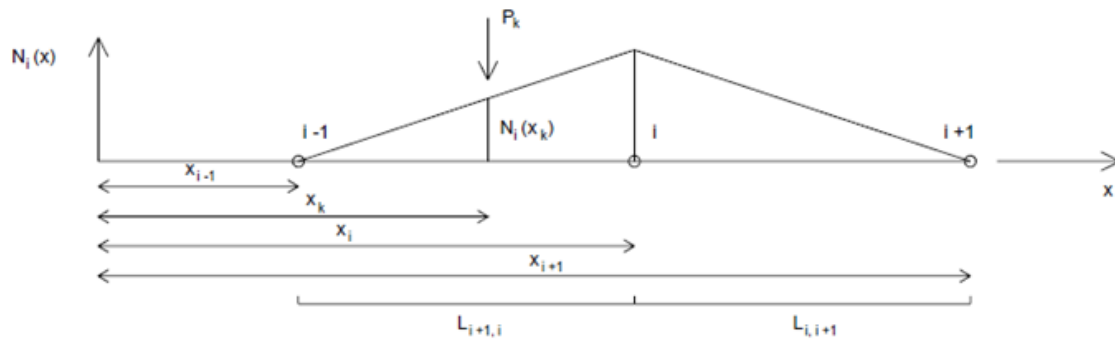


Fig. 61 – Esquema da variação da força nodal no nó i devido à passagem de uma carga móvel P_k (Ribeiro, 2004)

5.3.3. RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO DINÂMICO

Os problemas de análise dinâmica podem ser resolvidos por vários métodos como o método de sobreposição modal e de Newmark.

No estudo em causa foi utilizado o método de Newmark, sendo realizada uma análise modal para determinar as frequências naturais e os modos de vibração da estrutura. Por forma a escolher quais as frequências a utilizar no cálculo das constantes de amortecimento de Rayleigh referidas no ponto (5.3.1).

5.3.3.1. ANÁLISE MODAL

Nesta análise dinâmica pretende-se fundamentalmente perceber qual o comportamento da estrutura em função exclusiva das suas características de massa e rigidez, visto que é feita em regime livre e sem amortecimento para determinar as frequências naturais. Desta forma a equação de equilíbrio dinâmico assume uma nova configuração (Chopra, 1995):

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (5.23)$$

Se uma estrutura tiver um deslocamento (u) a uma dada frequência (w), este é do tipo harmónico e pode ser expresso da seguinte forma:

$$u = \phi \sin(wt + \varphi) \quad (5.24)$$

sendo (ϕ) um vector constante no tempo que caracteriza a forma da deformada da estrutura e (φ) a fase inicial.

Derivando a expressão (5.24) duas vezes em ordem ao tempo obtemos a expressão da aceleração em função do tempo.

$$\ddot{u} = -w^2\{\phi\}(wt + \varphi) \quad (5.25)$$

Substituindo os termos u e $\ddot{u}$ na expressão (5.23) obtém-se a seguinte:

$$[K - W^2 M]\{\phi\} = 0 \quad (5.26)$$

O determinante (5.26) pode ter soluções não nulas, quando o determinante $[K + W^2 M]$ se anular. O cálculo dos modos de vibração e suas frequências é caracterizado pelos valores e vectores próprios. Sendo que os valores correspondem às frequências e os vectores próprios aos modos de vibração, existindo assim um modo de vibração para cada frequência (Lopes, 2008).

As frequências e os modos de vibração no ANSYS® são conseguidos pelo método de Lanczos, revelando-se bastante eficiente em modelos muito complexos, que utilizam em simultâneo diversos elementos, como elementos de viga combinados com elementos sólidos.

5.3.3.2 MÉTODO DE NEWMARK

O método de Newmark resolve as equações diferenciais de equilíbrio dinâmico implicitamente por integração directa. Este método tem dois parâmetros (γ e β) que controlam a sua estabilidade e precisão. Desenvolvendo as funções $u(t)$ e $\ddot{u}(t)$, que são a solução do sistema de equações de equilíbrio dinâmico, em séries de Taylor resulta:

$$u = u + \Delta t \dot{u} + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u} + \frac{\Delta t^3}{6} \dddot{u} + \dots \quad (5.27)$$

$$\dot{u} = \dot{u} + \Delta t \ddot{u} + \frac{\Delta t^2}{2} \dddot{u} + \dots \quad (5.28)$$

Se considerarmos apenas os três primeiros termos da equação (5.27) e os dois primeiros da equação (5.28) e estimando $\ddot{u}$ com base nos valores do nó i ($\ddot{u}_i$ e $\ddot{u}_{i+1}$) obtemos as equações de Newmark:

$$u_{i+1} = u_i + \Delta t \dot{u}_i + (1 - \beta) \Delta t^2 \ddot{u}_i + \beta \Delta t^2 \ddot{u}_{i+1} \quad (5.30)$$

$$\dot{u}_i = \dot{u}_i + (1 - \gamma) \Delta t \ddot{u}_i + \gamma \Delta t \ddot{u}_{i+1} \quad (5.31)$$

Os parâmetros (γ e β) definem a variação da aceleração entre dois passos, para que o método seja incondicionalmente estável $\gamma \geq 1/2$ e para ter eficiência máxima em termos de dissipação algorítmica $\beta = (\gamma + 1/2)^2/4$. Mas para que este método exiba precisão de segunda ordem o $\gamma = 1/2$, logo $\beta = 1/4$, isto significa que a aceleração é constante (Faria, 1994).

$$\gamma \geq \frac{1}{2} \quad (5.32)$$

$$\beta = \frac{(\gamma + 1/2)^2}{4} \quad (5.33)$$

O incremento de tempo (Δt) com que o método se desenvolve no domínio do tempo, tem por base assegurar uma adequada representação dos primeiros modos de vibração. Este incremento está definido em ERRI D214/RP9, e é obtido pelo menor dos seguintes valores:

$$\Delta t = \frac{1}{8f_{max}} \quad (5.34)$$

$$\Delta t = \frac{L}{4nv_{max}} \quad (5.35)$$

em que (f_{max}) representa a frequência mais alta de vibração que se pretende considerar, (L) o vão, (n) o número de modos que se pretende considerar e (v_{max}) a velocidade máxima do comboio (Ribeiro, 2004).

Neste método é comum assumir a matriz de amortecimento de Rayleigh, que é apresentada na equação (5.7).

5.3.4. MODELAÇÃO DA VIA

O modelo de referência utilizado para analisar os efeitos dinâmicos da passagem de cargas rolantes numa estrutura, foi desenvolvido tendo em consideração o modelo utilizado por Nóbrega, (2010). Este é a duas dimensões em estado plano de tensão, considerando os modelos de transição propostos pela ADIF. Este modelo possui um desenvolvimento inicial total de 75 metros com uma passagem inferior do tipo box culvert na zona central.

Nesta modelação ouve a necessidade de estudar a melhor forma de conseguir reduzir ao máximo os tempos de cálculo, de maneira a atingir os objectivos propostos.

5.3.4.1. MODELAÇÃO DA SUPERESTRUTURA E SUBESTRUTURA

Como este estudo tem por base o estudo desenvolvido por Nóbrega, (2010), foi desenvolvido inicialmente um modelo com as características que serão apresentadas de seguida.

Na modelação do carril foi utilizada uma viga contínua, discretizada em elementos de viga (BEAM3) com 0,10 m de comprimento. Cada elemento tem uma rigidez à flexão de $(EI)_c$ e uma massa por unidade de comprimento igual à dos carris UIC 60, utilizados nas linhas de alta velocidade. O elemento de viga BEAM3 é definido por dois nós com dois graus de liberdade X,Y.

As palmilhas foram simuladas com elementos sem massa do tipo mola-amortecedor (COMBIN14) que podem ser submetidos a estados de tracção e compressão, com rigidez e amortecimento igual a

100×10^6 N/m e 60 kN.s/m para cada uma das palmilhas. A rigidez foi dividida em três porque cada palmilha foi discretizada em três elementos, como se pode observar na Fig. 62. É de notar que estas têm uma espessura de 0,05 metros.

As travessas utilizadas são do tipo monobloco de betão armado pré-esforçado, espaçadas de 0,60 metros, com uma massa volúmica de 2203 kg/m^3 , desenvolvimento de 2,60 metros e dimensões apresentadas na Fig. 62. A travessa foi modelada com elementos (PLANE42), atribuindo a cada travessa quatro elementos (Fig. 62), as características de cada uma são apresentadas no Quadro 8. Os elementos utilizados nesta modelação são de estado plano de tensão com quatro nós e dois graus de liberdade em cada nó, permitindo apenas deslocamentos na direcção X e Y.

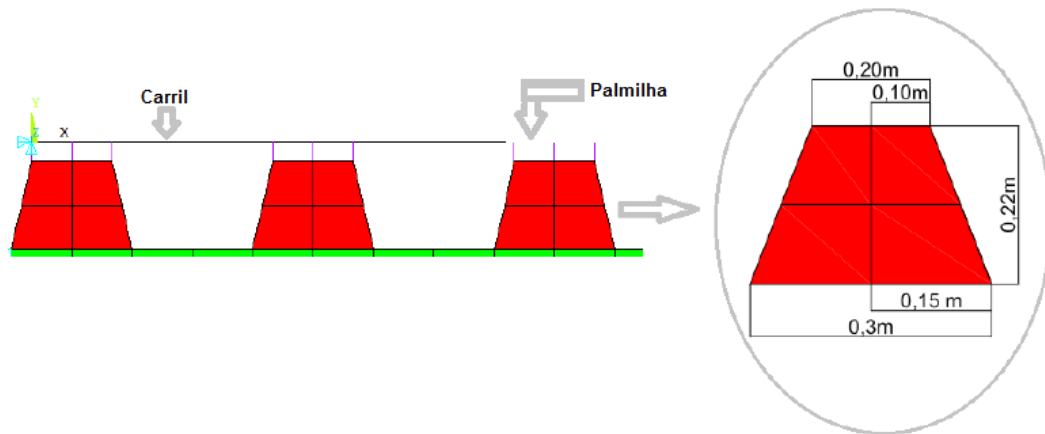


Fig. 62 – Modelação adoptada das travessas (adaptado de (Nóbrega, 2010))

No que diz respeito à camada de balastro e sub-balastro foram adoptados módulos de elasticidade iguais de 130 MPa, massa volúmica de 1529 kg/m^3 e 2090 kg/m^3 respectivamente (Quadro 8). As espessuras destas camadas são as propostas pelas disposições da ADIF, (2006) tendo o balastro 0,35 metros de espessura e o sub-balastro de 0,30 metros de espessura. Para a modelação destas camadas também foram utilizadas os elementos (PLANE42) com uma discretização horizontal de 0,15 m para o balastro e sub-balastro e uma discretização vertical de 0,175 e 0,15 m respectivamente como se pode observar na Fig. 63. A camada de forma tem um módulo de elasticidade de 90 MPa e massa volúmica de 1850 kg/m^3 , a espessura desta camada é de 0,40 metros, e para a modelar foram utilizados elementos (PLANE42), com uma discretização horizontal de 0,15 m e vertical de 0,40/3 m, (Fig. 63).

As características do balastro, sub-balastro e camada de forma foram atribuídas em função da ficha 719R, (UIC, 2008, Nóbrega, 2010 e Silva, 2010).

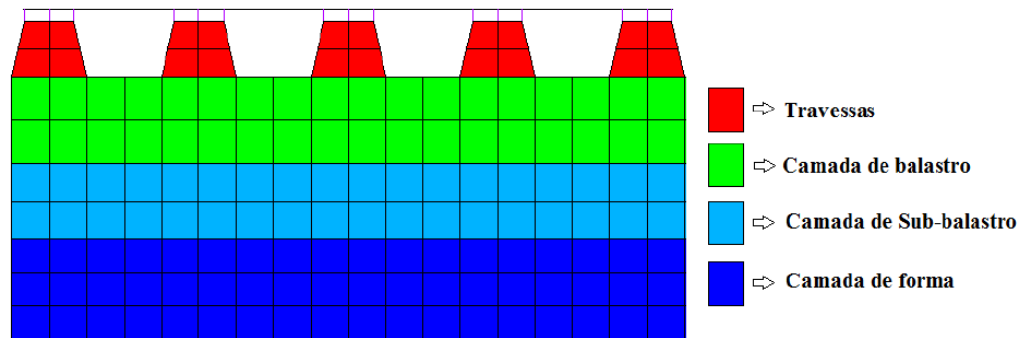


Fig. 63 – Pormenor da discretização adoptada nas camadas de balastro, sub-balastro e camada de forma
(Nóbrega, 2010)

Na modelação do material tratado, granular, aterro e fundação foram utilizados elementos de estado plano de tensão (PLANE42), mas a sua discretização foi cuidada de modo a ser o mais regular possível. A forma geométrica para cada uma das camadas tem por base as normas da ADIF, (2006). Na Fig. 64 está demonstrada a discretização adoptada para estes materiais. As características dos materiais estão presentes no Quadro 8 e tem por base os estudos desenvolvidos por (Nóbrega, 2010 e Silva, 2010).

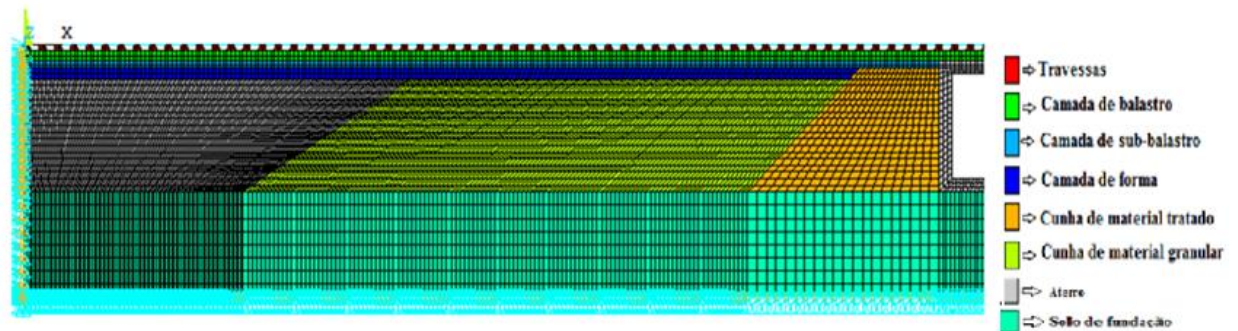


Fig. 64 – Pormenor da discretização adoptada nas cunhas de material tratado, granular, aterro e fundação
(adaptado de (Nóbrega, 2010))

Quadro 8 – Características de cada elemento utilizado na modelação

Elementos	Características	Elemento utilizado (ANSYS®)
Carril	- E= 200 GPa $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ - A= 154 cm^2 - I= $61,1 \times 10^{-6} \text{ m}^4$	Elemento de viga (BEAM3)
Palmilhas	- K= $100 \times 10^6 \text{ N/m}$ - C= 60 kN.s/m	Elemento mola-amortecedor (COMBIN14)
Travessas	- E= 25 GPa $\nu = 0,20$ $\rho = 2203 \text{ kg/m}^3$	Elemento de estado plano de tensão (PLANE42)
Balastro	- E= 130 MPa $\nu = 0,20$ $\rho = 1529 \text{ kg/m}^3$	Elemento de estado plano de tensão (PLANE42)
Sub-balastro	- E= 130 MPa $\nu = 0,20$ $\rho = 2090 \text{ kg/m}^3$	Elemento de estado plano de tensão (PLANE42)
Camada de forma	- E= 90 MPa $\nu = 0,30$ $\rho = 1850 \text{ kg/m}^3$	Elemento de estado plano de tensão (PLANE42)
Material Tratado	- E= 4,8 GPa $\nu = 0,35$ $\rho = 2170 \text{ kg/m}^3$	Elemento de estado plano de tensão (PLANE42)
Material Granular	- E= 120 MPa $\nu = 0,30$ $\rho = 2145 \text{ kg/m}^3$	Elemento de estado plano de tensão (PLANE42)
Aterro	- E= 80 MPa $\nu = 0,30$ $\rho = 1980 \text{ kg/m}^3$	Elemento de estado plano de tensão (PLANE42)
Fundação	- E= 60 MPa $\nu = 0,30$ $\rho = 1950 \text{ kg/m}^3$	Elemento de estado plano de tensão (PLANE42)

5.3.4.2. MODELAÇÃO DA BOX CULVERT

A box culvert é pré-fabricada em betão armado, tem 10,20 metros de largura por 8,20 metros de altura, com uma espessura de 0,90 metros. Foi modelada em elementos de estado plano de tensão (PLANE42) com uma discretização igual à do material imediatamente adjacente, como se pode verificar na imagem seguinte (Fig. 65), sendo uma peça única. Quanto as características dos materiais são as descritas no Quadro 9.

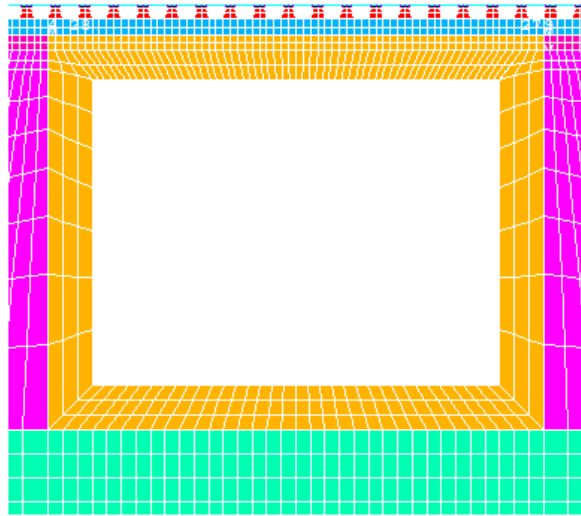


Fig. 65 – Discretização utilizada na box culvert (modelo I)

Quadro 9 – Características utilizadas na modelação da box culvert

Elemento	Características	Elemento utilizado no ANSYS®
Box-culvert	▪ $E = 30 \text{ GPa}$ ▪ $\nu = 0,20$ ▪ $\rho = 2548 \text{ kg/m}^3$	Elemento de estado plano de tensão (PLANE42)

5.3.4.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO PLANO 2D

Na modelação desenvolvida o tipo de elemento utilizado (PLANE42) permite criar elementos sólidos a duas dimensões com uma determinada espessura em estado plano de tensão. Então esta calibração consiste em atribuir uma espessura aos vários elementos do modelo, para garantir uma resposta semelhante entre os modelos a duas dimensões e a três dimensões quando sujeitos a carregamentos estáticos semelhantes. É de salientar que a travessa tem a sua espessura real que é 2,60 metros, esta calibração só se aplica às restantes camadas (Ferreira, 2009).

Esta calibração tem por base um estudo desenvolvido por Ferreira, (2009) onde foi analisada a influência da altura de cada camada de solo de fundação (H_{solo}), bem como do seu módulo de deformabilidade (E_{solo}). Na calibração do modelo em estudo vamos focar-nos nos resultados obtidos para uma altura total da camada do solo de fundação de 12 metros. Por análise destes resultados retiramos a espessura para cada camada do solo de fundação em função da sua profundidade relativa e do seu respectivo módulo de elasticidade (Fig. 66). No estudo desenvolvido foram obtidas as espessuras para intervalos de 0,50 metros para o solo de fundação.

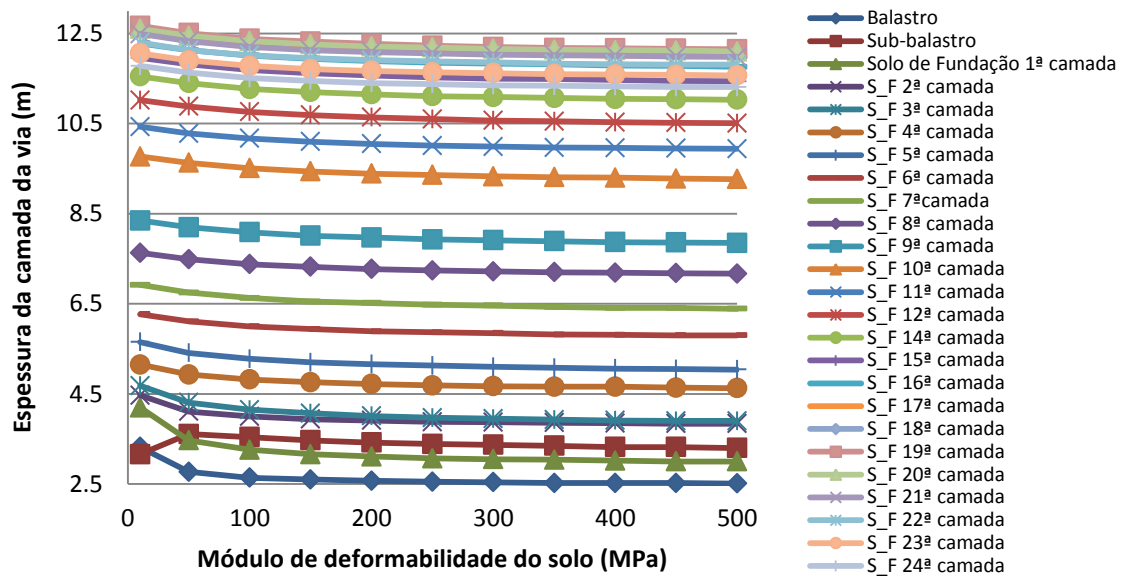


Fig. 66 – Variação da espessura em função do módulo de deformabilidade para $H_{\text{solo}}=12$ m (adaptado de (Ferreira, 2009))

5.3.4.4. CONDIÇÕES FRONTEIRA DO MODELO

Visto que é impossível modelar uma via-férrea com um desenvolvimento infinito é necessário delimitar o modelo através de apoios que tentem ao máximo reproduzir as condições reais. Por isso foram introduzidos apoios duplos na base da fundação para simular uma fronteira rígida, impedindo assim os deslocamentos em X e Y (Fig. 67). E foi colocado também um apoio no ponto inicial do modelo à cota do carril por forma a impedir o seu deslocamento horizontal.

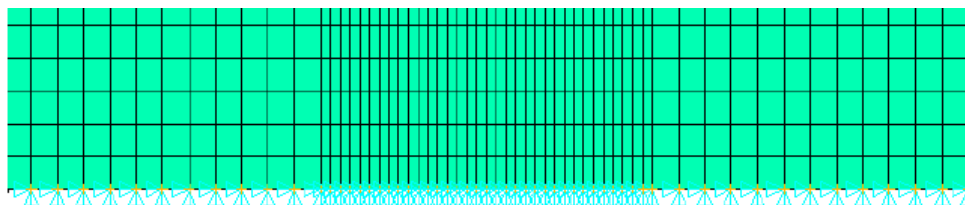


Fig. 67 – Condições de apoio do solo de fundação (adaptado de (Nóbrega, 2010))

No que diz respeito às fronteiras laterais, estas devem simular a continuidade do modelo pois tem como principal função impedir a reflexão das ondas geradas a partir das fronteiras, que podem deturpar os resultados obtidos. Para precaver que tal situação ocorra foram criados apoios laterais com elementos (COMBIN14), ou seja, amortecedores viscosos na horizontal (Cv_n) e na vertical (Cv_t), que simulam a continuidade do modelo. Este tipo de apoio foi colocado em todos os nós laterais do modelo com recurso a elementos de barra (BEAM3) muito rígidos e sem peso que os ligam a um apoio exterior fixo como se pode verificar na Fig. 68 (Faria, 1994).

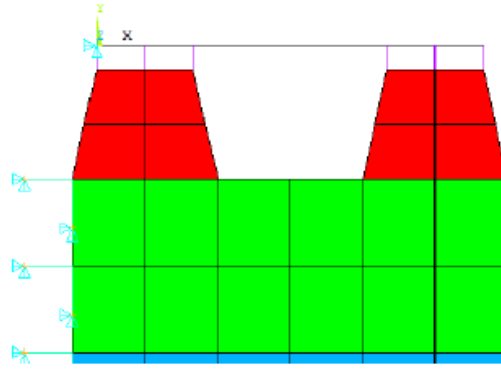


Fig. 68 – Representação de amortecedores viscosos na camada de balastro (Nóbrega, 2010)

O amortecimento foi calculado pela matriz (6.31) desenvolvida por White (1971), para modelos a duas dimensões com amortecimento viscoso.

$$\begin{bmatrix} Cv_n \\ Cv_t \end{bmatrix} = \frac{8\sqrt{\rho G}}{15\pi} \begin{bmatrix} \frac{5}{s} - 2 \times s + 2 & 0 \\ 0 & 2 \times s + 3 \end{bmatrix} \quad (6.31)$$

$$s = \frac{\sqrt{(1-2v)}}{2(1-v)} \quad (6.32)$$

$$G = \frac{E}{2(1+v)} \quad (6.33)$$

Nas expressões apresentadas G é o módulo de rigidez elástica, ρ a massa volúmica e v o coeficiente de Poisson. No Quadro 10 estão expostas as componentes de amortecimento viscoso a aplicar nos diversos apoios laterais do modelo.

Quadro 10 – Cálculo do amortecimento visto das fronteiras laterais

	Balastro	Sub-balastro	Camada de forma	Aterro	Fundação
E (MPa)	130	130	90	80	60
v	0,20	0,20	0,30	0,30	0,30
ρ (kg/m ³)	1529	2090	1850	1980	1950
s	0,612	0,612	0,535	0,535	0,535
G (MPa)	54,167	54,167	34,615	30,769	23,077
Cv_n	436784,185	510665,249	441852,946	430971,176	370393,680
Cv_t	206404,490	241317,346	174808,195	170503,092	146537,103

5.3.4.5. AMORTECIMENTO DE RAYLEIGH

Para calcular as constantes de amortecimento de Rayleigh (a_0 e a_1), foi necessário executar uma análise modal, sendo apresentados na Fig. 69 os primeiros seis modos considerados. Através do Quadro 11 foi calculado o coeficiente de amortecimento, adotando-se 2%, e considerando um intervalo de frequências entre 4 e 70 Hz. No Quadro 11 são apresentados os valores das constantes de amortecimento de Rayleigh utilizados.

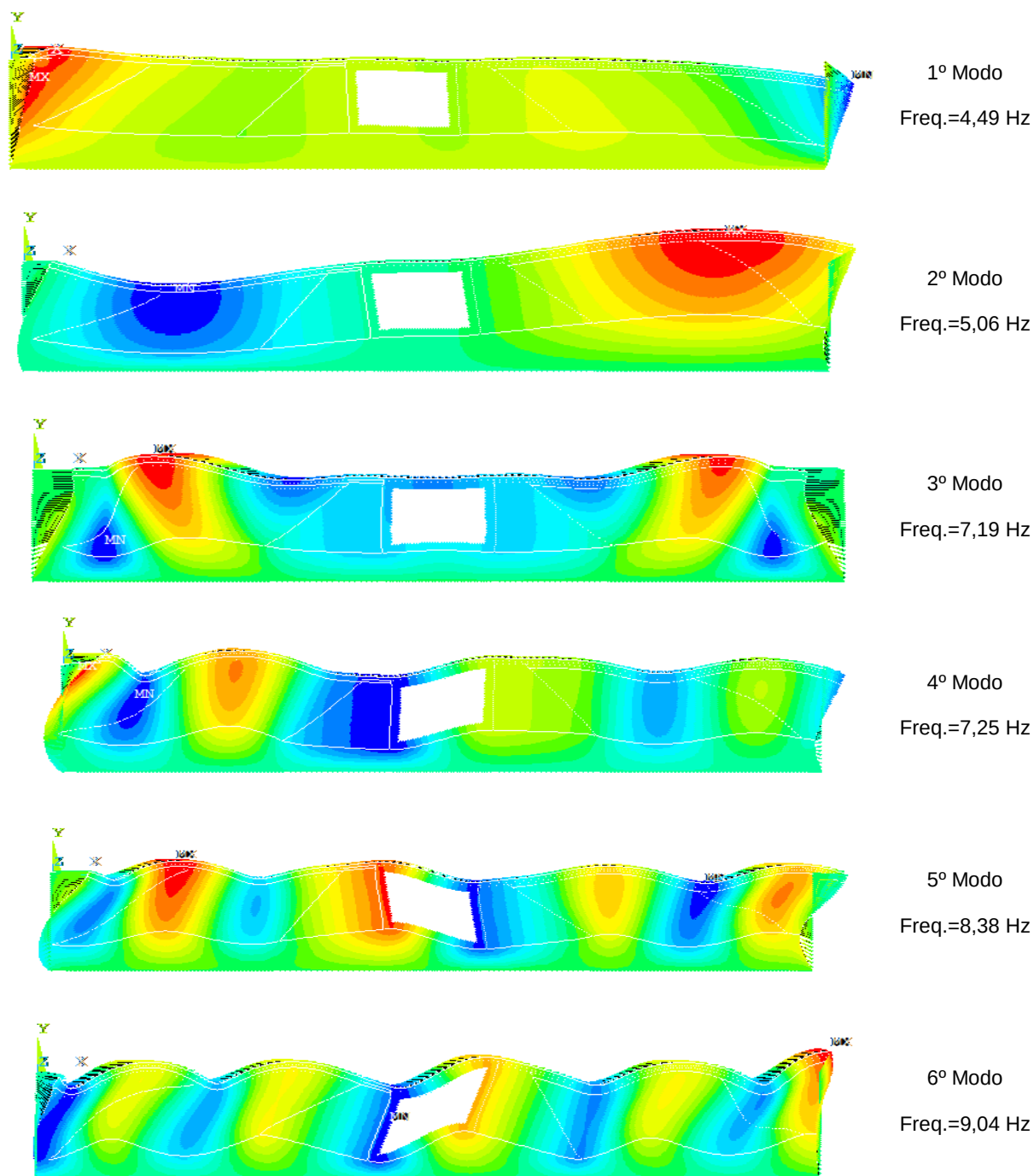


Fig. 69 – Modos de vibração natural do modelo I

Quadro 11 – Constantes de amortecimento de Rayleigh

Modelo	Coef. de Amortecimento	Frequências (Hz)		ω (rad/s ⁻¹)		a_0	a_1
		Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
I	2%	4	70	25,133	439,823	9,51E-1	8,60E-5

5.3.4.6. ALTERAÇÕES NO MODELO (I)

Depois de desenvolvido este modelo (I) foram calculados os deslocamentos e acelerações para uma velocidade de 420 km/h com um dos dez comboios do modelo HSLM-A, o comboio A-9. Este modelo apresenta algumas limitações na obtenção de esforços nos diversos pontos da box culvert, devido ao elemento sólido utilizado (PLANE42) que não permite que estes sejam retirados directamente. E também é muito desfavorável no que diz respeito ao tempo de cálculo despendido. Por estas razões foi desenvolvido um novo modelo (II) que difere apenas do modelo anterior na modelação da box, utilizando elementos de viga (BEAM3).

Apesar de se alterar o elemento utilizado na modelação da box culvert as suas características são as mesmas (Quadro 9), assim como a discretização utilizada que é igual à da camada imediatamente adjacente à box (Fig. 70). Foi utilizado também o mesmo amortecimento de Rayleigh, pois a frequência de vibração natural no primeiro modo é da mesma ordem de grandeza como se constata na Fig. 71.

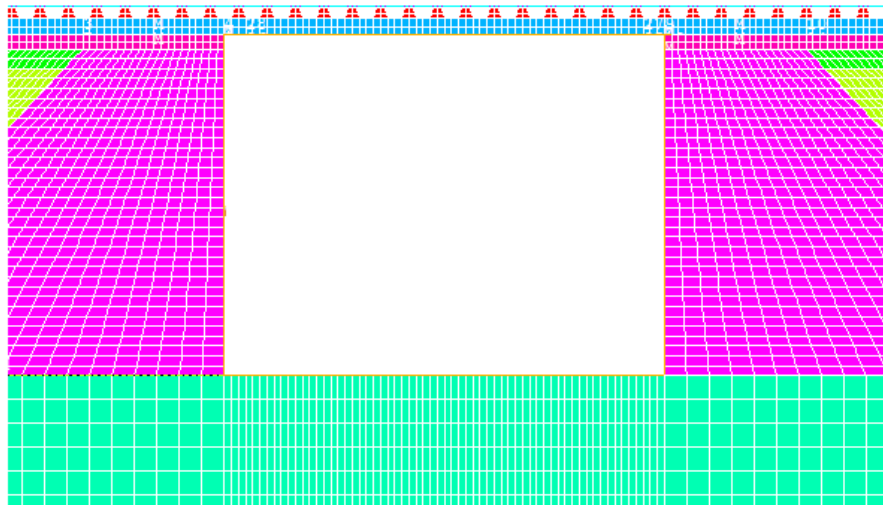


Fig. 70 – Discretização utilizada na box culvert (modelo II)

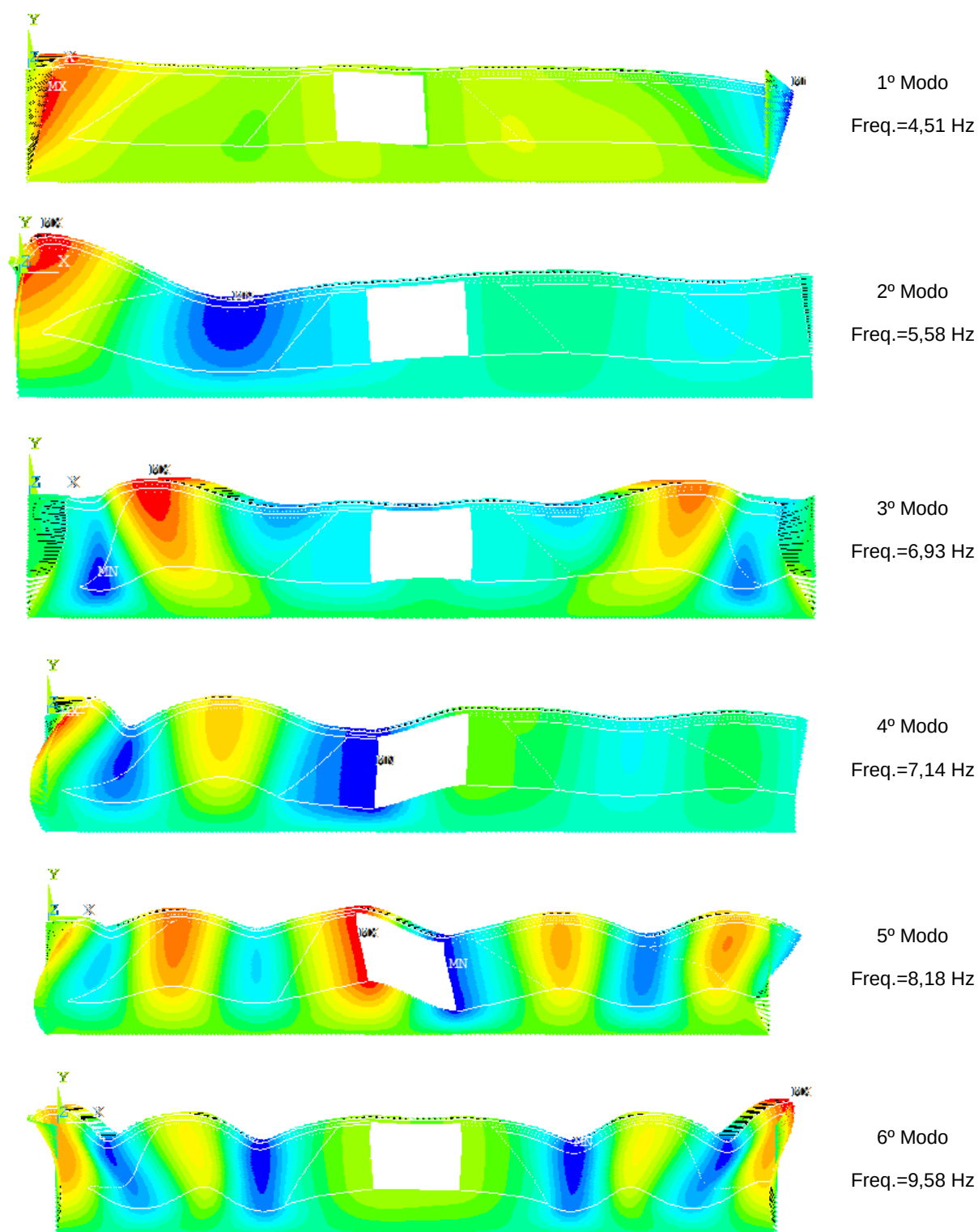


Fig. 71 - Modos de vibração natural do modelo II

5.3.4.7. ALTERAÇÕES NO MODELO (II)

Como a box culvert que se pretende modelar é de quatro lados, formada por duas peças em U sobrepostas (Fig. 12 c)), foi necessário modelar a ligação entre as duas peças em U, materializada através de duas rótulas. Neste modelo (III) não existem quaisquer alterações para além da criação de rótulas na box, para que a modelação seja o mais realista possível.

A modelação das rótulas na box foi conseguida pela criação de dois nós sobrepostos na zona de ligação entre as duas peças em U (Fig. 72 b)). Sendo que cada elemento se liga nesta zona a nós distintos, de modo a simular a separação entre as duas peças em U. Como a única alteração deste modelo relativamente ao modelo II é a introdução de rótulas foi utilizado o mesmo amortecimento de Rayleigh. Mas foi realizada da mesma forma uma análise modal por forma a verificar as frequências naturais no primeiro modo.

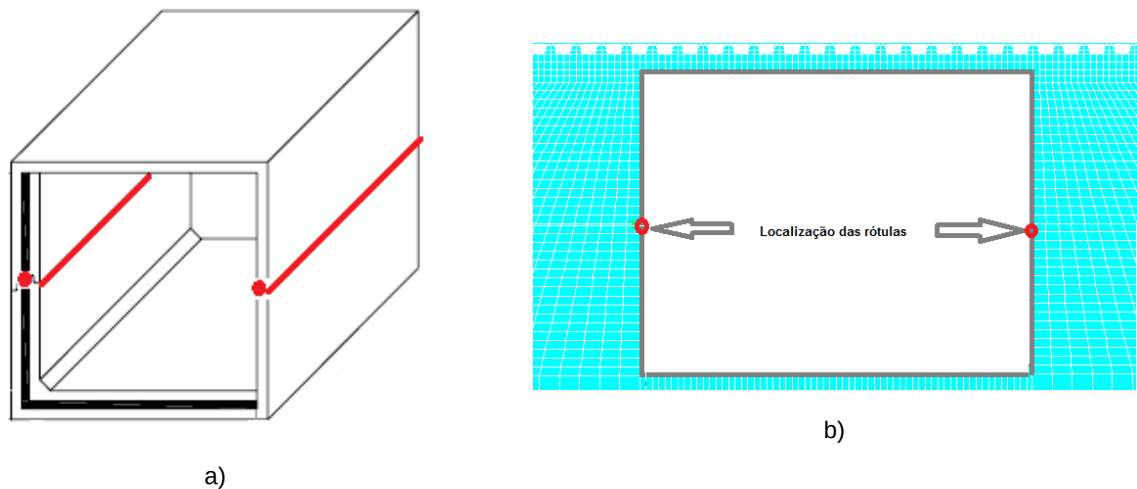


Fig. 72 – a) Exemplo da box culvert utilizada na modelação (adaptado de (FARCIMAR, 2011)) b) Localização das rótulas no modelo

No presente modelo foi utilizado o mesmo amortecimento de Rayleigh, pois a frequência de vibração natural no primeiro modo é da mesma ordem de grandeza como se pode constatar na Fig. 73.

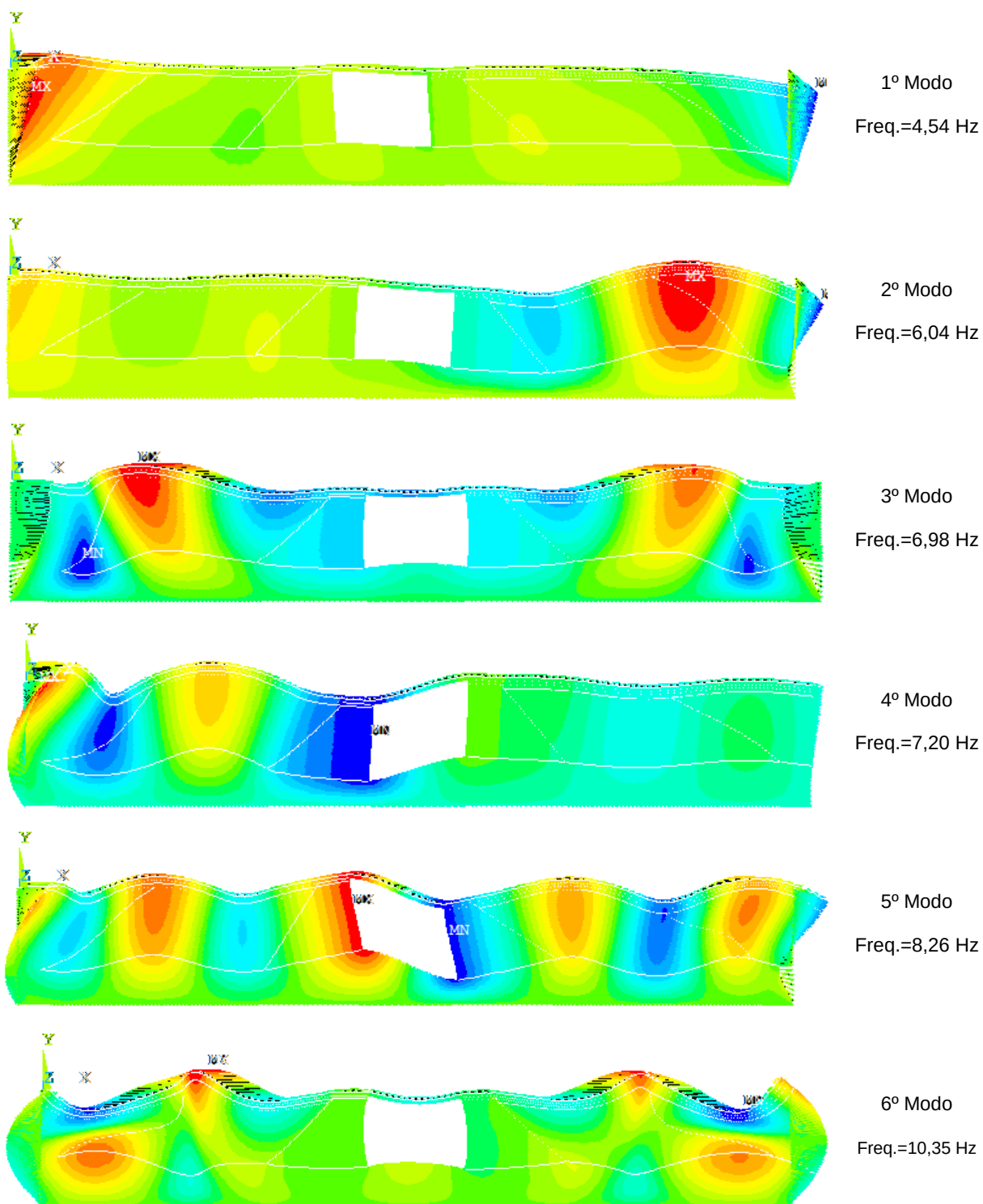


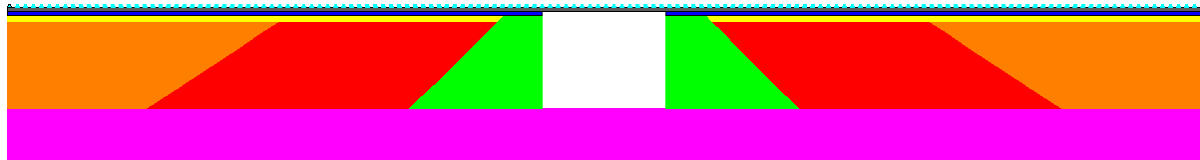
Fig. 73 - Modos de vibração natural do modelo III

5.3.4.8. MODELO FINAL ADOPTADO (IV)

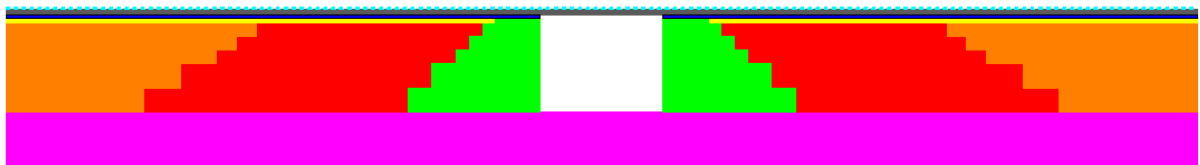
O modelo (III) apesar de utilizar elementos de viga (BEAM3) para modelar a box e ter rótulas, não sofreu qualquer alteração na discretização da malha no desenvolvimento dos vários modelos

anteriormente descritos. Logo surgiu a necessidade de proceder a algumas simplificações mais acentuadas, visto que os modelos desenvolvidos, (I, II e III) têm uma grande limitação que é o tempo despendido em cada cálculo devido ao seu elevado número de nós e elementos.

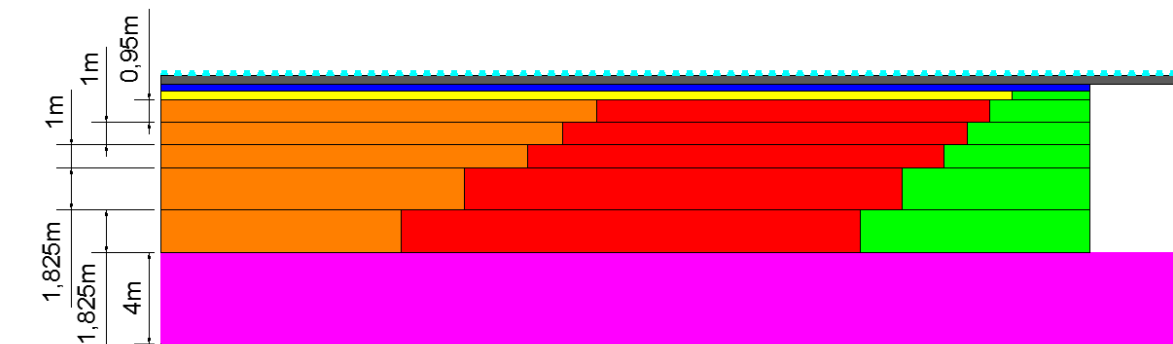
Por isso foi adoptado um modelo ligeiramente diferente do anteriormente desenvolvido, considerando da mesma forma todas as regras de dimensionamento da ADIF, (2006). A extensão total adoptada para este modelo (IV) é de 90 metros, com uma simplificação das inclinações dos materiais tratados, granulares e de aterro, sendo esta inclinação simplificada pela utilização de vários patamares criteriosamente divididos (Fig. 74 b) c)).



a)



b)



Legenda:

Travessa	Aterro
Balastro	Material granular
Sub-balastro	Material tratado
Camada de Forma	Fundação

c)

Fig. 74 – a) Modelo da ADIF com os estratos inclinados b) Modelo utilizado por simplificação do modelo (a) c) Alturas dos vários patamares e da fundação

No desenvolvimento deste modelo foram utilizadas as características dos materiais anteriormente especificadas (Quadro 8 e Quadro 9), variando apenas a discretização da malha e alguns elementos utilizados na modelação.

No que diz respeito à modelação do carril e das palmilhas mantiveram-se todas as opções tomadas nos modelos anteriormente desenvolvidos (Fig. 75). Estas são demonstradas no quadro seguinte.

Quadro 12 – Especificação das opções tomadas na modelação do carril e das palmilhas

Elementos	Descretização	Elemento utilizado (ANSYS®)
Carril	0,10 m	Elemento de viga (BEAM3)
Palmilha	3 elementos	Elemento mola-amortecedor (COMBIN14)

As travessas foram modeladas com elementos de estado plano (PLANE183), atribuindo a cada travessa um único elemento com oito nós (Fig. 75), com as características apresentadas no Quadro 8.

Os elementos (PLANE183), são elementos de estado plano de tensão com oito nós e dois graus de liberdade por nó, ou seja, apenas permite deslocamentos no eixo dos X e Y. Optou-se por utilizar estes elementos de forma a gerar uma malha irregular em algumas camadas do modelo para reduzir o número de nós e permitir que a malha aumente mais rapidamente em profundidade e fique o mais regular possível.

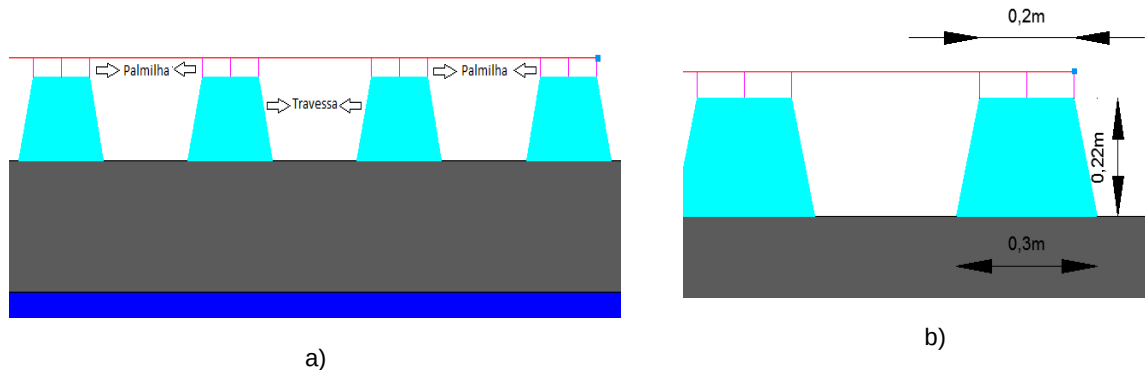


Fig. 75 – a) Exemplo da modelação das palmilhas e das travessas b) Dimensões da travessa

Para a modelação das camadas de balastro, sub-balastro e camada de forma também foi utilizado o elemento de volume (PLANE183), com uma discretização irregular como se pode ver na Fig. 76.

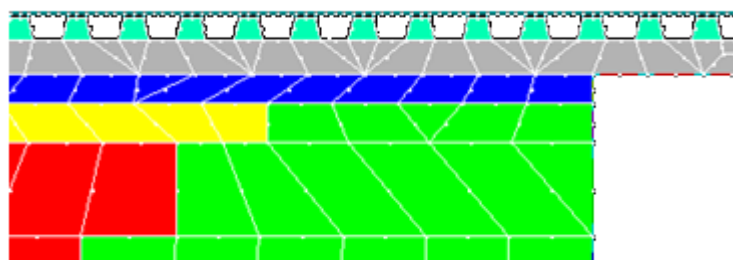


Fig. 76 – Pormenor de discretização utilizada no balastro, sub-balastro e camada de forma

Na modelação do material tratado, granular, aterro e fundação foi utilizado o elemento (PLANE183), mas a sua discretização foi mais cuidada de modo a ser o mais regular possível. Na Fig. 77 é apresentada a discretização adoptada para estes materiais.

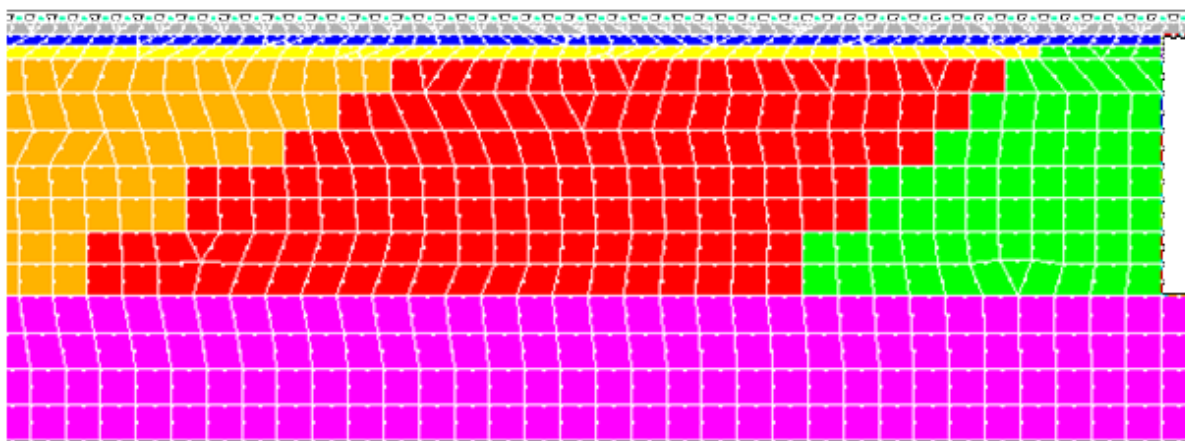


Fig. 77– Pormenor da discretização utilizada no material tratado, material granular, aterro e fundação

Na box culvert não foram feitas alterações quanto à modelação, pois considerou-se que esta iria ser modelada em elementos de viga (BEAM3), com uma discretização igual à do material imediatamente adjacente como se pode ver na Fig. 78. E utilizando rótulas na ligação entre as duas peças em U como no modelo III.

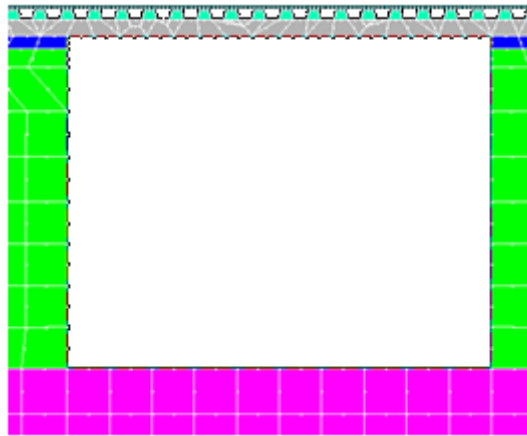


Fig. 78 – Discretização utilizada na box culvert (modelo IV)

No que diz respeito à calibração do modelo e às condições de apoio, pode-se dizer que foram realizadas de acordo com os métodos apresentados nos pontos (5.3.4.3) e (5.3.4.4.) respectivamente. O amortecimento adoptado para este modelo (IV) foi o mesmo do modelo I, visto que pela análise modal efectuada também apresenta frequências muito próximas deste, podendo observar na Fig. 79 alguns modos. Na Fig. 80 é apresentado o aspecto final do modelo IV.

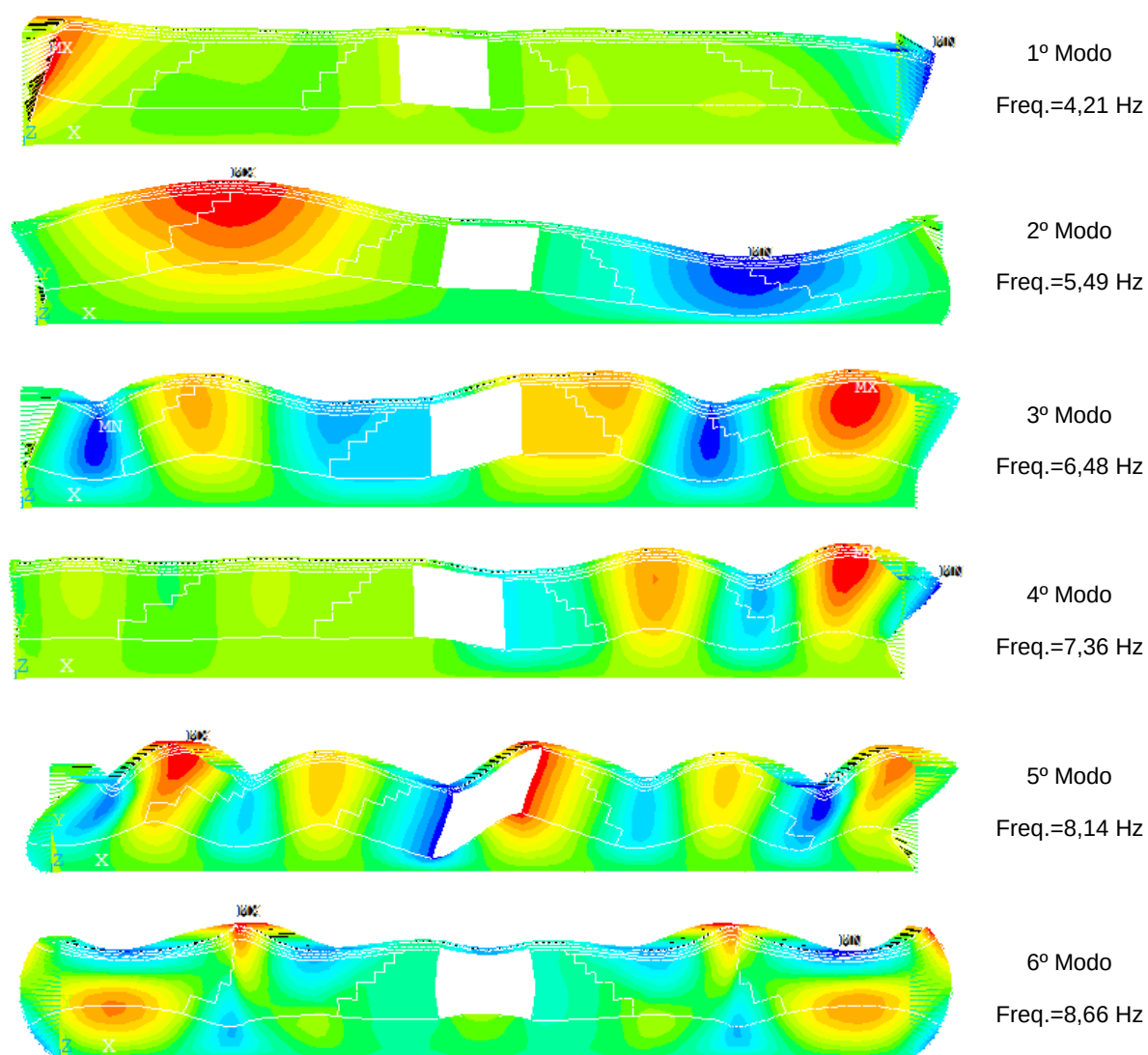


Fig. 79 – Modos de vibração natural do modelo IV

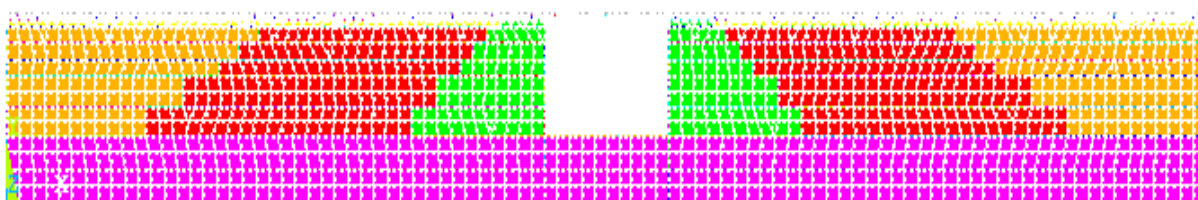


Fig. 80 – Aspecto final da discretização do modelo IV

6

ANÁLISE DINÂMICA

6.1. ANÁLISE COMPARATIVA INICIAL

Depois de concluídas as modelações apresentadas no capítulo 5 foi feito um estudo comparativo entre os mesmos, de forma a perceber como as respostas dinâmicas variam de modelo para modelo. A seguir é apresentado um quadro resumo sobre os modelos analisados.

Quadro 13 – Modelos utilizados na análise comparativa

Modelo em estudo	Dimensões da Box-culvert (m)	Espessura (m)	Elemento utilizado (ANSYS®)	Rótulas
Modelo I	10,20 x 8,20	0,90	Elemento de estado plano de tensão (PLANE42)	Não
Modelo II	10,20 x 8,20	0,90	Elemento de viga (BEAM3)	Não
Modelo III	10,20 x 8,20	0,90	Elemento de viga (BEAM3)	Sim
Modelo IV ^a	10,20 x 8,20	0,90	Elemento de viga (BEAM3)	Sim

^a Apresenta uma malha menos refinada que o modelo III, mas com elementos de 8 nós

Neste estudo vão ser apresentados os efeitos dinâmicos que um dos comboios do modelo de carga HSLM-A, o comboio A-9, introduz na estrutura para os diferentes modelos em estudo. Esta análise comparativa inicial foi efectuada para uma velocidade de 420 km/h e tem como principal intuito perceber como as respostas dinâmicas evoluem nas secções da box-culvert apresentadas na Fig. 81 de modelo para modelo. Foram escolhidas estas secções porque se apresentaram como os mais desfavoráveis no que diz respeito ao comportamento estrutural.

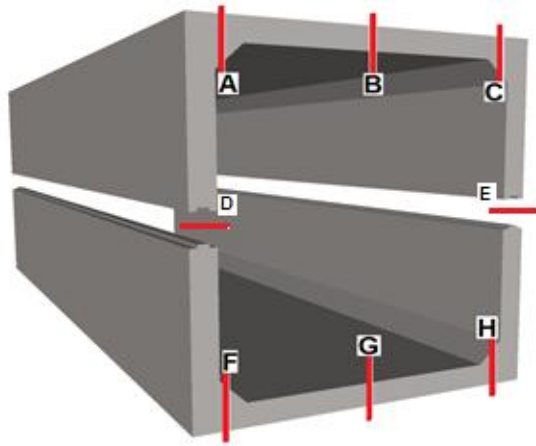


Fig. 81 - Esquema da box-culvert utilizada neste trabalho e referência às secções utilizadas na análise comparativa

6.1.1. COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO I E O MODELO II

Na comparação entre o modelo I e o modelo II o que está em causa é a utilização de elementos de viga na modelação da estrutura em detrimento de elementos de estado plano de tensão, visto que estes se apresentam como mais desfavoráveis na obtenção da resposta dinâmica da estrutura. Os resultados apresentados foram obtidos através da análise dos dois modelos à velocidade de 420 km/h com o modelo de carga dinâmica HSLM-A9. Na Fig. 82 é exibido um exemplo comparativo dos deslocamentos e das acelerações na secção B, nesta podemos concluir que o comportamento da estrutura é muito semelhante apesar de existirem tanto nos deslocamentos como nas acelerações ligeiras diferenças. Estas podem ser justificadas pelo facto do modelo I apresentar uma altura maior, pois a estrutura no modelo II é modelada a eixo. No Anexo A1 são apresentadas as respostas dinâmicas para as diversas secções analisadas, constatando-se uma diferença mais significativa nas acelerações que nos deslocamentos, que pode ser justificada pelo facto da altura do modelo variar, logo a sua espessura.

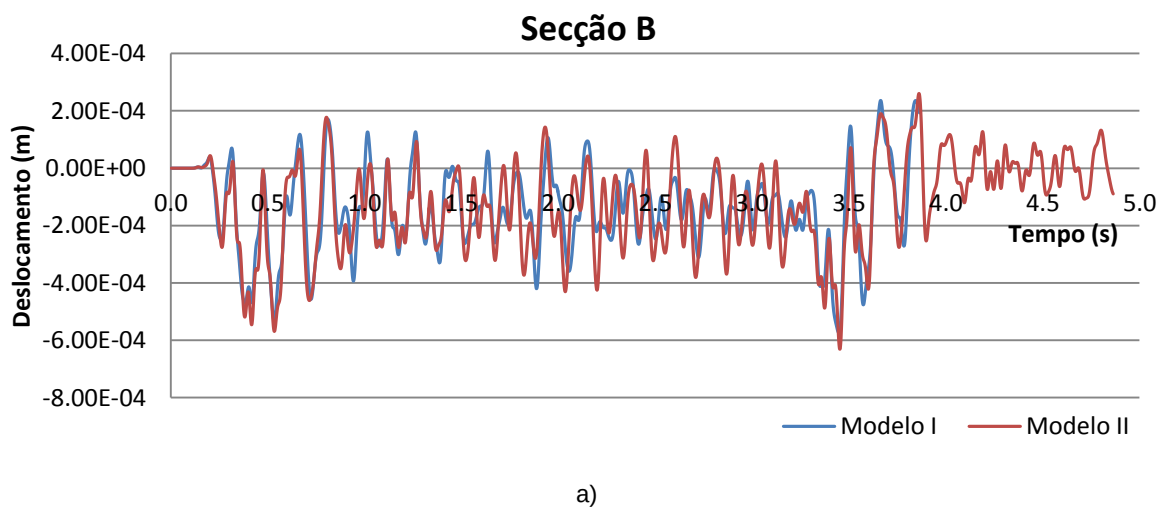


Fig. 82 - Comparação de resultados entre o modelo I e II a) Deslocamentos b) Acelerações

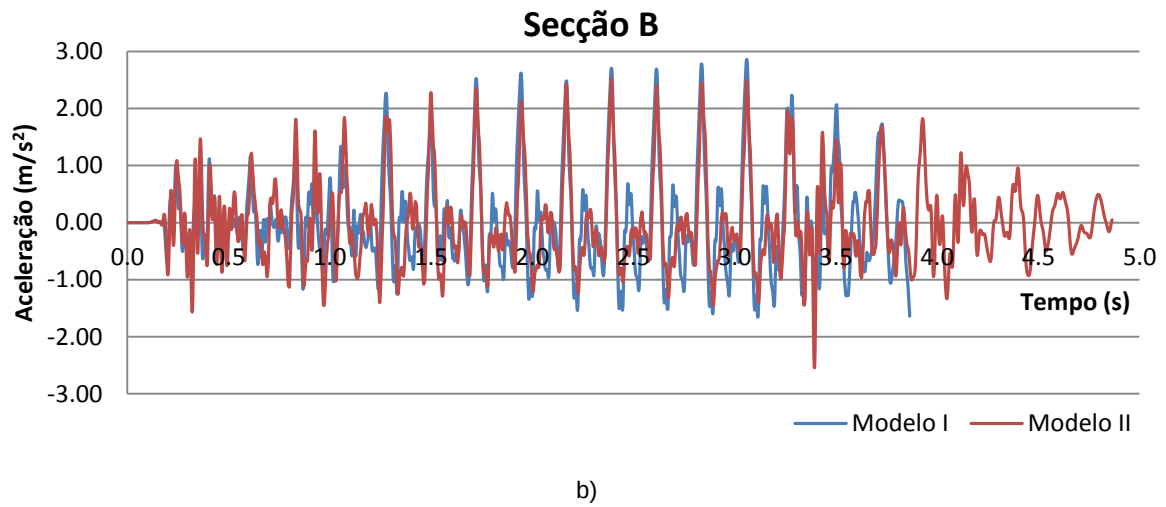


Fig. 82 - Comparação de resultados entre o modelo I e II a) Deslocamentos b) Acelerações (continuação)

6.1.2. COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO II E O MODELO III

Os modelos apresentados neste ponto (II e III) são praticamente iguais, diferindo apenas na modelação da box culvert, onde foram modeladas rótulas na ligação das duas peças em U no modelo III. Estes dois modelos foram comparados para uma velocidade de circulação de 420 km/h com o modelo de carga dinâmico HSLM-A9. Na Fig. 83 são apresentadas as respostas dinâmicas obtidas para a secção A no modelo II e III.

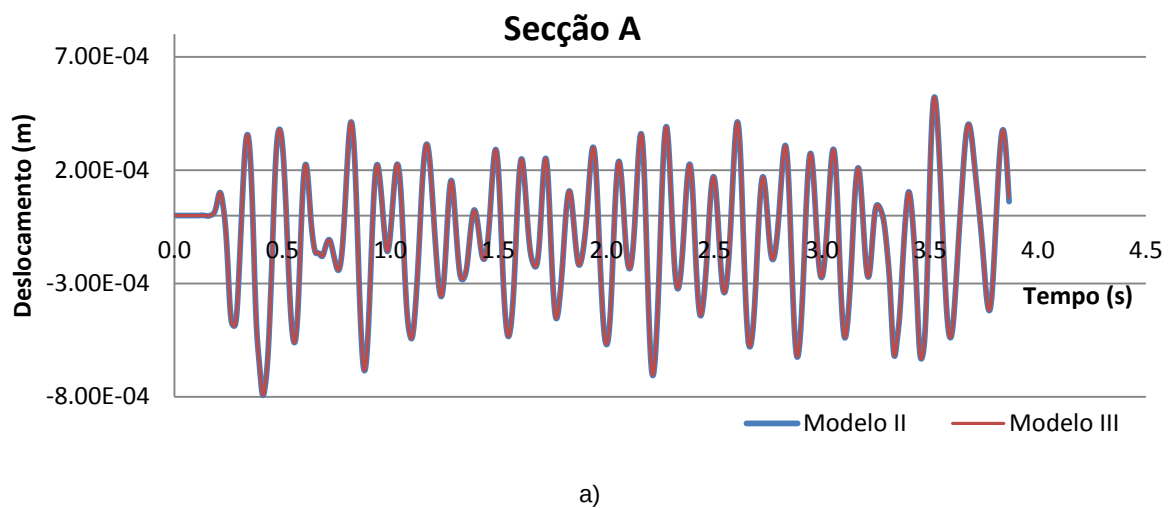
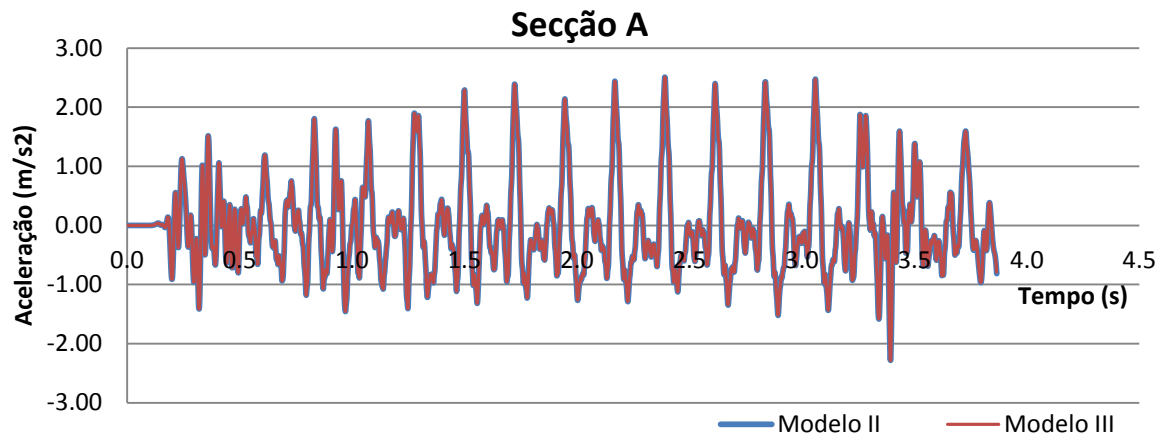
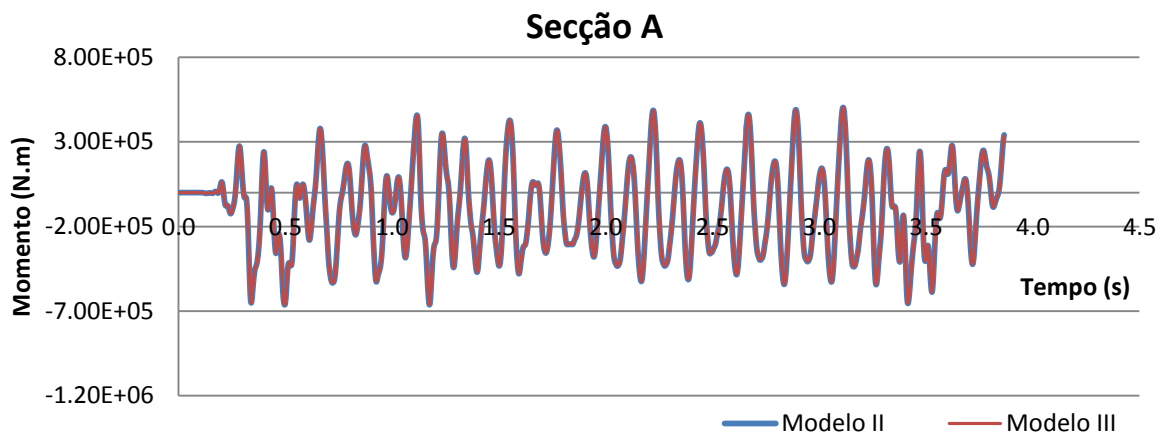


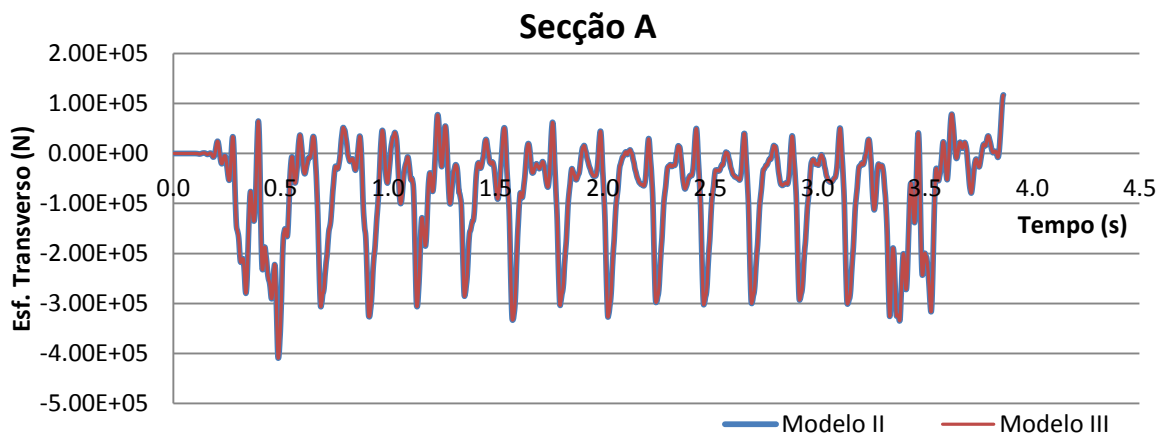
Fig. 83 - Comparação de resultados entre o modelo II e III a) Deslocamentos b) Acelerações c) Momentos flectores d) Esforços transversos



b)



c)



d)

Fig. 83 - Comparação de resultados entre o modelo II e III a) Deslocamentos b) Acelerações c) Momentos flectores d) Esforços transversos (continuação)

Pela análise da figura anterior podemos concluir que estes dois modelos apresentam um comportamento muito semelhante na secção A, apesar do modelo III ser ligeiramente diferente. Isto

também se reflecte nas restantes secções, como se pode constatar na tabela comparativa apresentada no Anexo A2, apesar de existir uma ligeira diferença nos valores máximos apresentados. No que diz respeito às rótulas podemos dizer que não alteram significativamente a resposta dinâmica do modelo III relativamente ao II, apesar de se verificar um ligeiro aumento dos esforços transversos na secção E. Para se poder concluir que estas não são muito significativas no que diz respeito à resposta dinâmica seria necessário desenvolver um estudo comparativo para várias velocidades e modelos de carga dinâmica, pois através de uma única análise não se pode tirar tal conclusão.

6.1.3. COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO III E O MODELO IV

Como estes dois modelos são muito parecidos no que diz respeito à definição da box culvert e apenas diferem na discretização da malha foi feita uma análise para duas velocidades de circulação 380 e 420 km/h, utilizando também o modelo de carga dinâmico HSLM-A9. Na Fig. 84 são apresentados alguns gráficos para a secção C com diferentes grandezas tentando demonstrar o quão próximos são os resultados obtidos para os dois modelos. As grandezas comparadas são os deslocamentos, as acelerações, os momentos flectores e os esforços transversos à velocidade de 380 km/h.

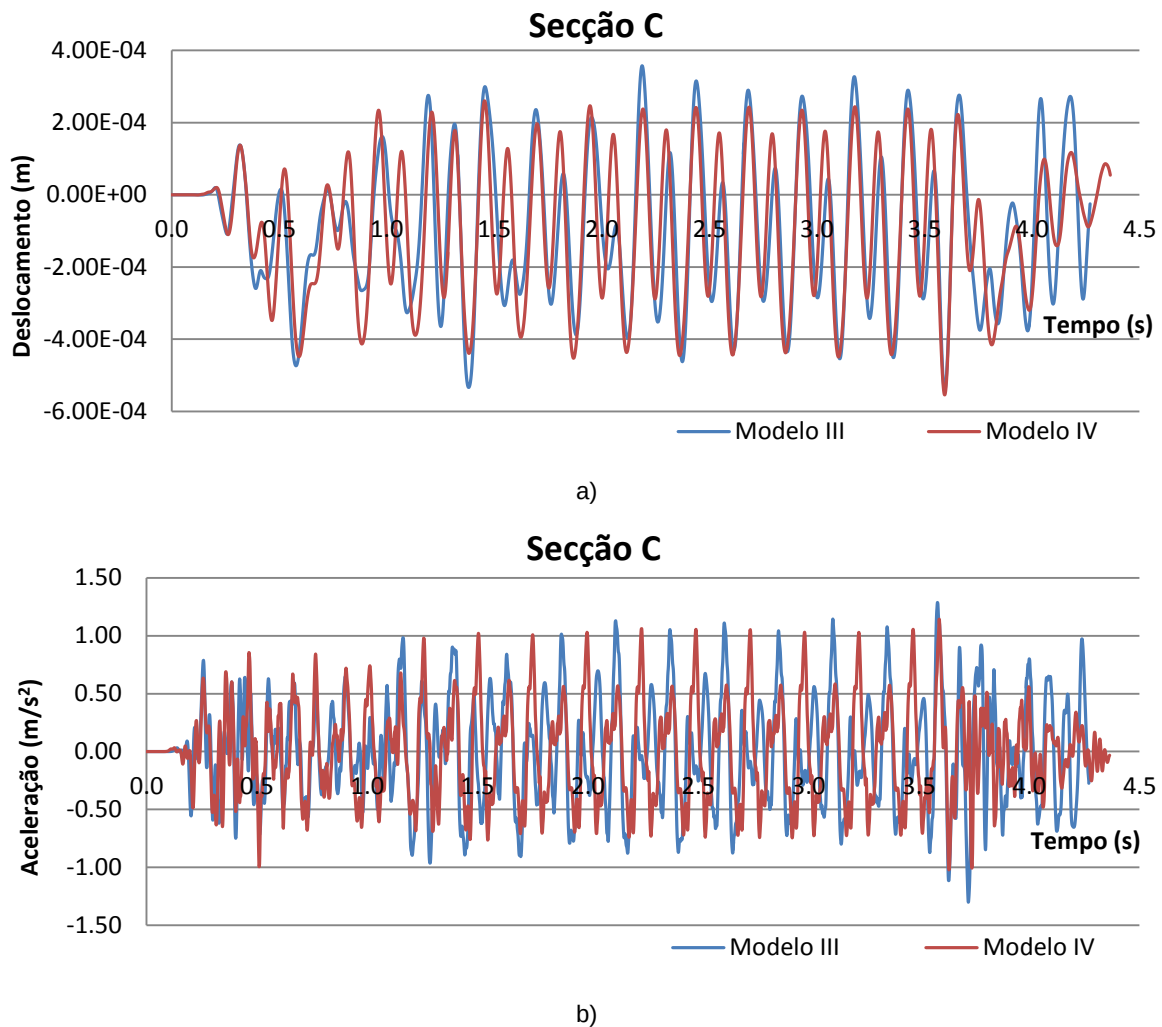
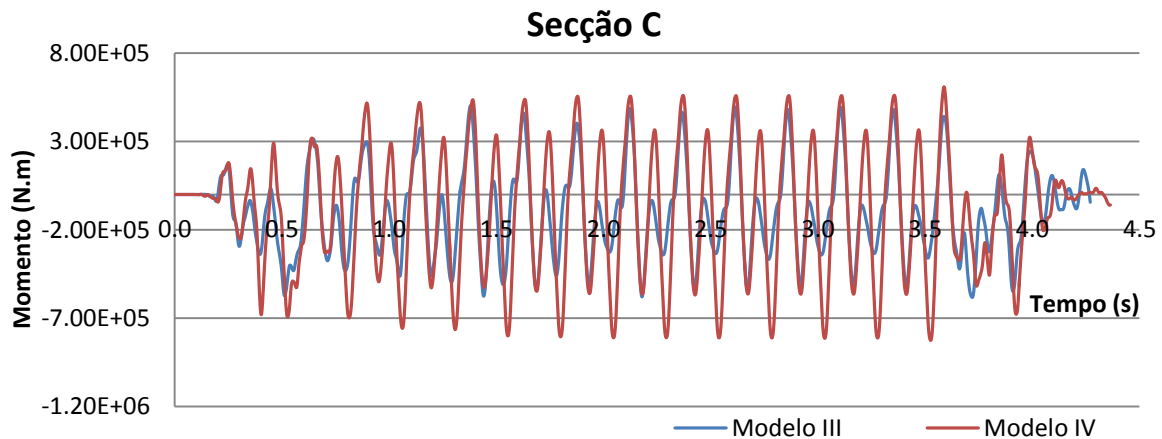
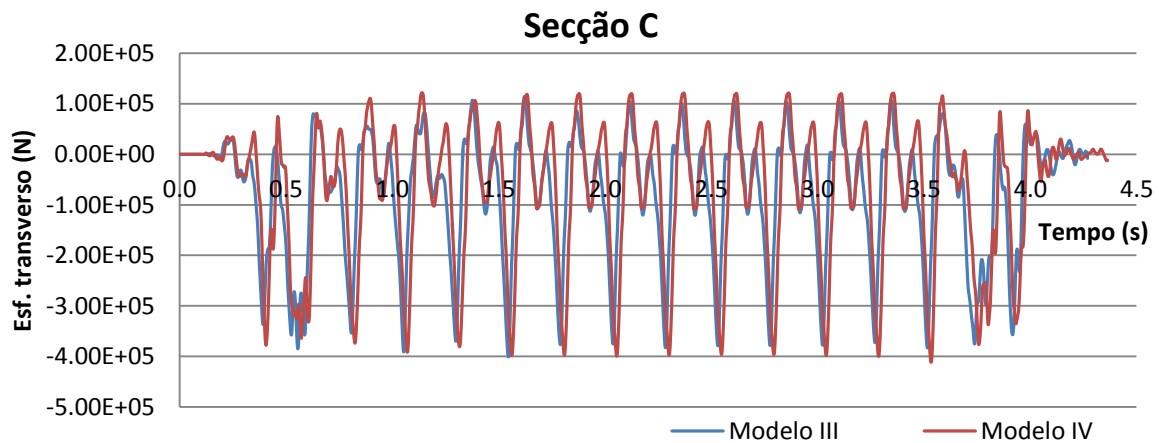


Fig. 84 – Comparação de resultados entre o modelo III e IV a) Deslocamentos b) Acelerações c) Momentos flectores d) Esforços transversos



c)



d)

Fig. 84 – Comparação de resultados entre o modelo III e IV a) Deslocamentos b) Acelerações c) Momentos flectores d) Esforços transversos (continuação)

Pela análise dos gráficos anteriores percebe-se que estes dois modelos apresentam uma grande proximidade de resultados, sendo que as ligeiras diferenças que apresentam se justificam pela diferença de frequências naturais e pela diferente discretização de malha. No Anexo A3 são apresentados os máximos valores para os modelos em estudo nas diferentes secções à velocidade de 380 e 400 km/h.

6.2. ANÁLISE DINÂMICA

Concluído o estudo comparativo inicial foi adoptado o modelo IV como o modelo a analisar, pois apresenta-se como o mais económico no tempo de cálculo despendido, assim como exibe resultados muito próximos dos modelos estudados anteriormente.

A análise dinâmica vai ser realizada para todos os comboios de carga HSLM-A com o intuito de perceber como as velocidades e os vários modelos de carga influenciam os efeitos dinâmicos na

estrutura, bem como os seus efeitos ressonantes. Estas análises vão ser efectuadas para uma gama de velocidades entre os 200 e os 420 km/h, com incrementos de 20 km/h.

Assim são obtidos os valores máximos de deslocamento, aceleração, momentos e esforços transversos para cada secção em cada velocidade de circulação. As secções em que vão ser retiradas estas grandezas são as já apresentados na Fig. 81 incluindo também as zonas de ligação entre as duas peças em U (Fig. 85) tendo sido escolhidas pelo facto de se apresentarem como as zonas mais críticas do ponto de vista estrutural como foi referido anteriormente.

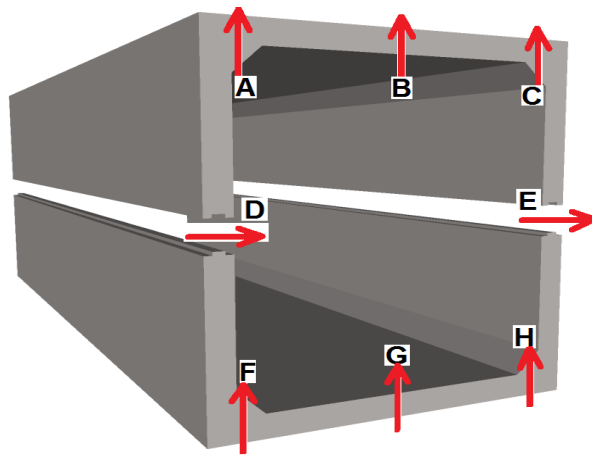


Fig. 85 – Esquema de pontos onde foram retirados os deslocamentos, acelerações, momentos e esforços transversos

6.2.1. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Antes de se iniciar a análise dinâmica propriamente dita, foi feita uma análise de sensibilidade para perceber qual o incremento de tempo a utilizar visto que este parâmetro pode influenciar o tempo de cálculo despendido e os resultados obtidos. Esta análise foi feita recorrendo ao modelo de carga HSLM-A, utilizando o comboio A-9 à velocidade de 400 e 420 km/h. Foi tomado como referência o cálculo com incrementos de tempo de 0,002 s. Então foram realizados cálculos com incrementos de 0,003, 0,004 e 0,005 s para perceber de que forma este parâmetro influencia os resultados e calcular o seu erro relativamente aos valores de referência.

A seguir são apresentadas graficamente algumas comparações entre os diversos cenários considerados para a secção B a 400 km/h.

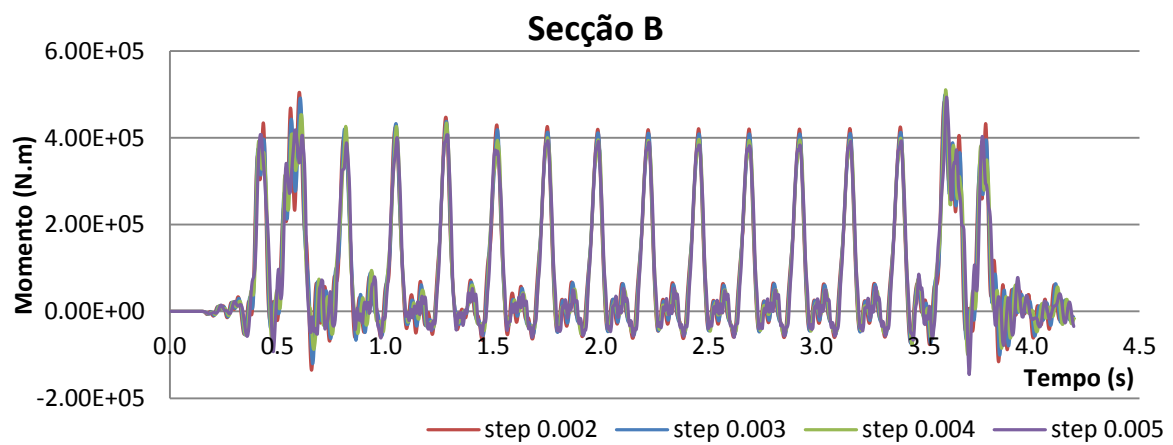
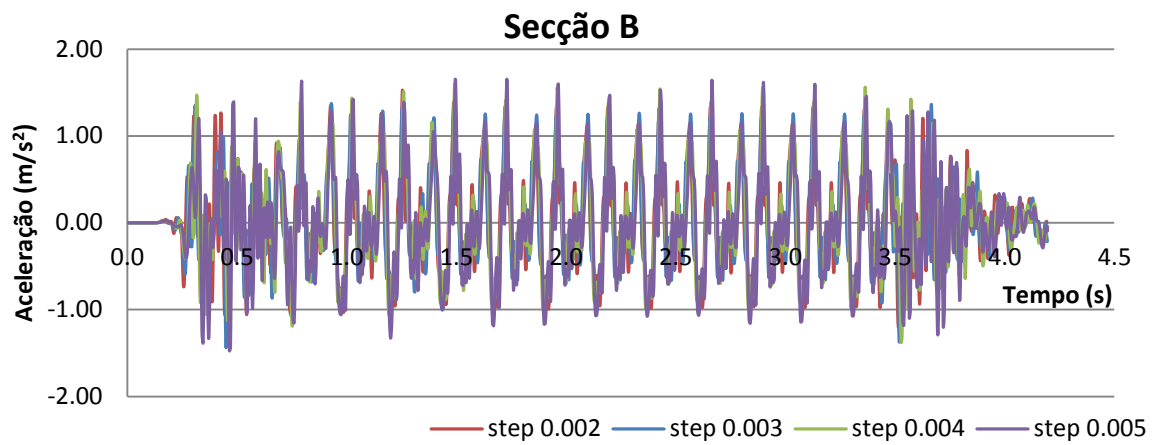
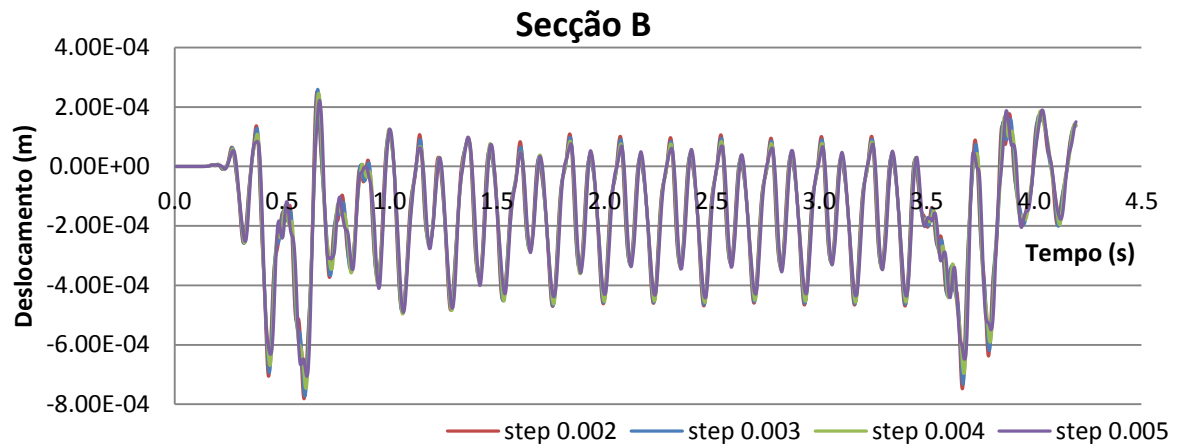


Fig. 86 – Resultados no ponto B para os diferentes steps a) Deslocamentos b) Acelerações c) Momentos flectores d) Esforços transversos

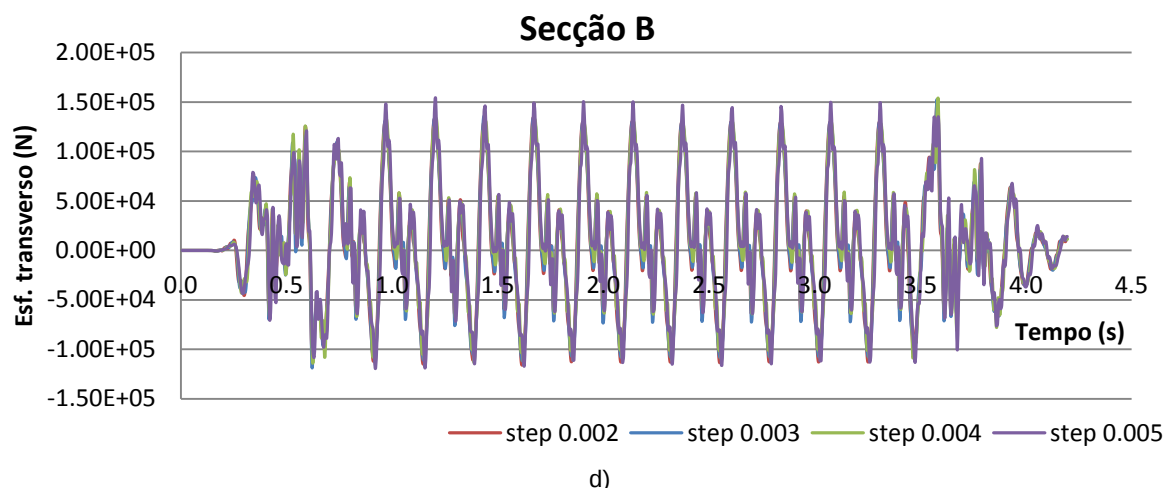


Fig. 86 – Resultados no ponto B para os diferentes steps a) Deslocamentos b) Acelerações c) Momentos flectores d) Esforços transversos (continuação)

Na Fig. 86 podem-se observar ligeiras diferenças em função do incremento de tempo adoptado, mas no Quadro 14 são apresentados os resultados máximos de cada grandeza para cada incremento na secção B, sendo calculado o seu erro relativamente aos valores de referência, percebendo assim qual o incremento que nos conduz ao menor. Pela análise do quadro facilmente se percebe que o incremento que nos leva ao menor erro geral é o 0,003 s, verificando-se esta tendência em todos os pontos analisados para as duas velocidades consideradas, apesar de a aceleração apresentar um erro mais significativo que as restantes grandezas como se pode verificar no Anexo A4 onde são apresentados todos os resultados máximos obtidos nesta comparação para as diversas secções consideradas.

Concluída a análise de todos os resultados foi adoptado um incremento de tempo de 0,003 s, mesmo com um erro no cálculo da aceleração relativamente ao cálculo efectuado para o incremento de referência elevado. Esta escolha é justificada pela significativa redução de tempo despendido nas análises e pelo facto de este incremento conduzir aos menores erros nas secções estudadas.

Quadro 14 – Comparação de resultados na secção B para vários incrementos de tempo

Incrementos de tempo (s)	Secção B				Erro (%)		
	0,002	0,003	0,004	0,005	0,003	0,004	0,005
Momentos (N.m)	5,044E+05	4,992E+05	5,099E+05	4,937E+05	1,0%	-1,1%	2,1%
	-1,355E+05	-1,207E+05	-1,003E+05	-1,455E+05	10,9%	26,0%	-7,4%
Deslocamentos (m)	2,511E-04	2,595E-04	2,452E-04	2,226E-04	-3,3%	2,4%	11,3%
	-7,815E-04	-7,729E-04	-7,461E-04	-7,062E-04	1,1%	4,5%	9,6%
Acelerações (m/s ²)	1,528E+00	1,374E+00	1,602E+00	1,654E+00	10,1%	-4,8%	-8,2%
	-1,207E+00	-1,438E+00	-1,374E+00	-1,473E+00	-19,2%	-13,8%	-22,0%
Esf. Transverso (N)	1,500E+05	1,527E+05	1,532E+05	1,540E+05	-1,8%	-2,1%	-2,6%
	-1,159E+05	-1,188E+05	-1,140E+05	-1,194E+05	-2,5%	1,7%	-3,0%

6.2.2. ANÁLISE DINÂMICA DO MODELO FINAL

6.2.2.1. DESLOCAMENTOS NA BOX CULVERT

Na Fig. 85 são apresentadas as secções onde se vão retirar os deslocamentos, sendo apresentados no Anexo A5 todos os valores máximos das referidas secções para os vários modelos de carga dinâmica e velocidades de circulação. Neste anexo também são apresentados gráficos comparativos de deslocamentos entre as mesmas secções para diferentes modelos de carga e entre secções do mesmo.

Nesta análise comparativa não são apresentadas todas as comparações efectuadas, tendo sido escolhidos os modelos HSLM-A9 e A10 a título de exemplo e porque se apresentam como os mais gravosos para a estrutura na generalidade das secções no que diz respeito aos efeitos dinâmicos induzidos em todas as velocidades estudadas, destacando um ligeiro aumento em relação aos restantes comboios a partir dos 300 km/h. Na Fig. 87 são apresentados dois gráficos comparativos de deslocamentos para duas secções distintas, percebendo assim a tendência dos deslocamentos em função da velocidade. No Anexo A9.1 são apresentados os gráficos comparativos de todas as secções analisadas para todos os comboios estudados.

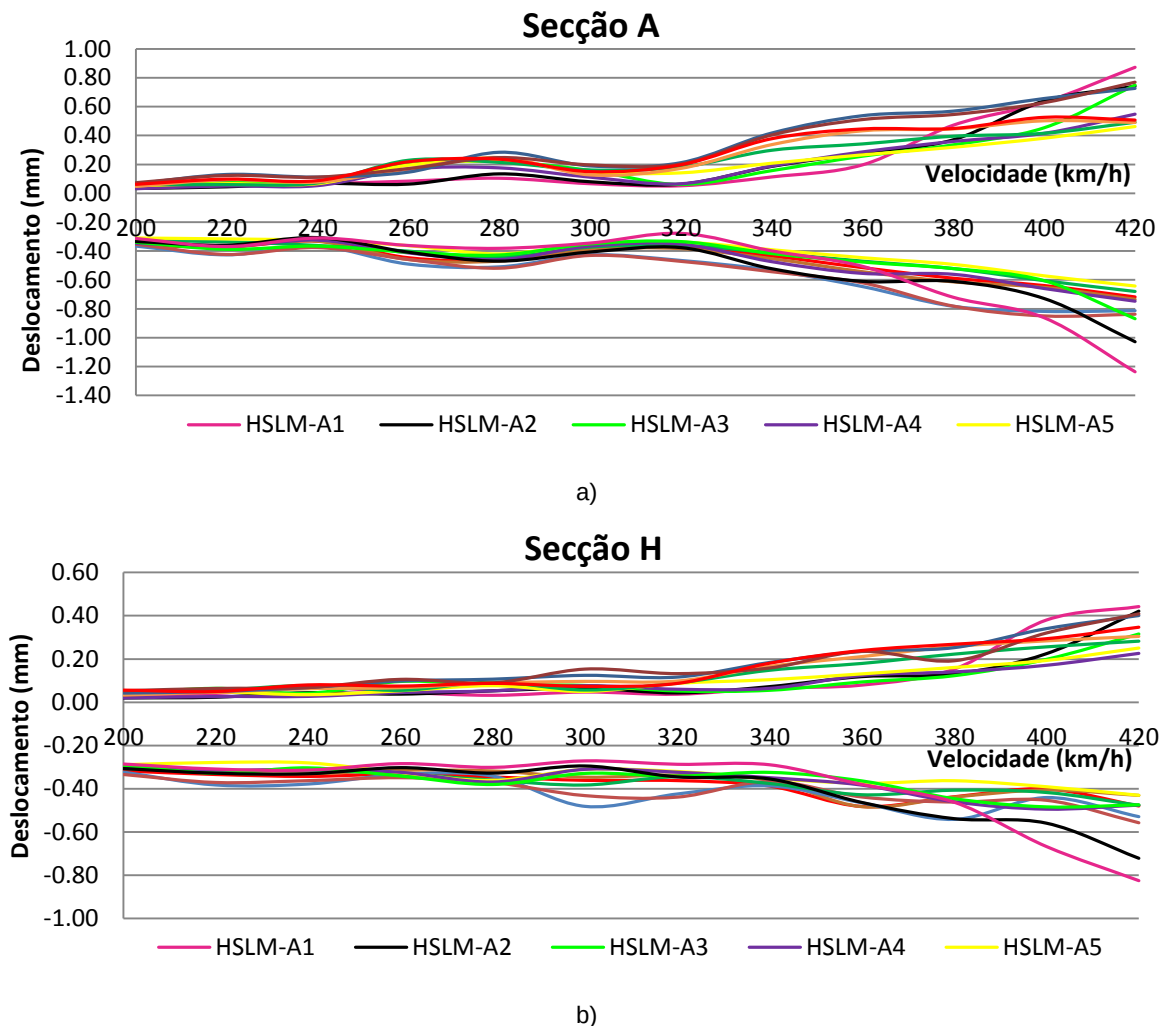


Fig. 87 – Comparação de deslocamentos entre modelos de carga para a secção A (a) e para a secção H (b))

Na Fig. 88 e na Fig. 89 são apresentadas as evoluções dos deslocamentos máximos positivos e negativos para todas as secções em estudo, em função das velocidades de circulação para os modelos de carga HSLM-A9 e A10. Observando as figuras podemos concluir que os deslocamentos agravam-se com o aumento da velocidade de circulação. Quando as velocidades de circulação se encontram entre os 200 km/h e os 300 km/h verificamos que os deslocamentos não sofrem grandes alterações na generalidade das secções, e pelo contrário a partir dos 340 km/h verifica-se um aumento significativo dos deslocamentos. A velocidade que implementa os maiores deslocamentos na estrutura analisada é a de 420 km/h.

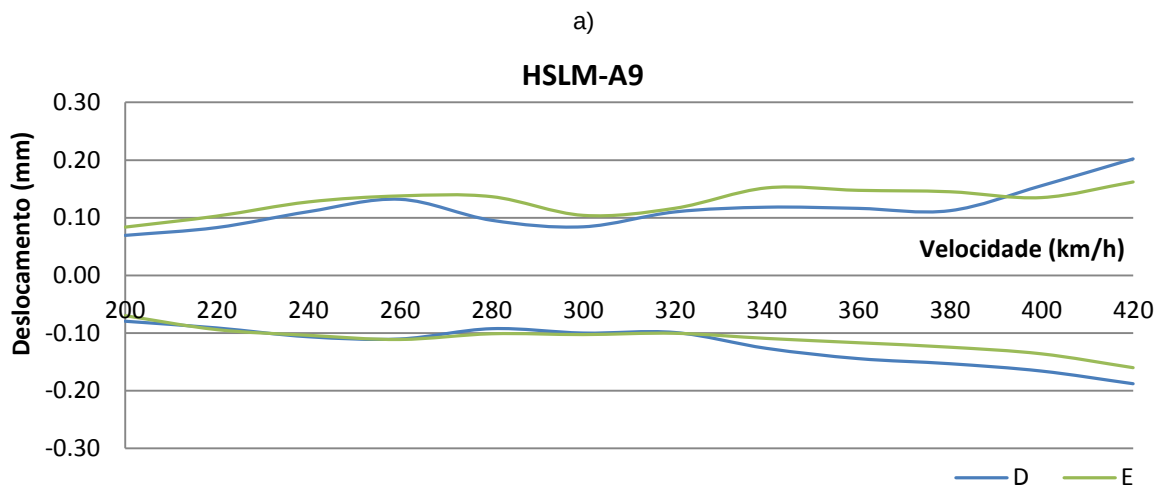
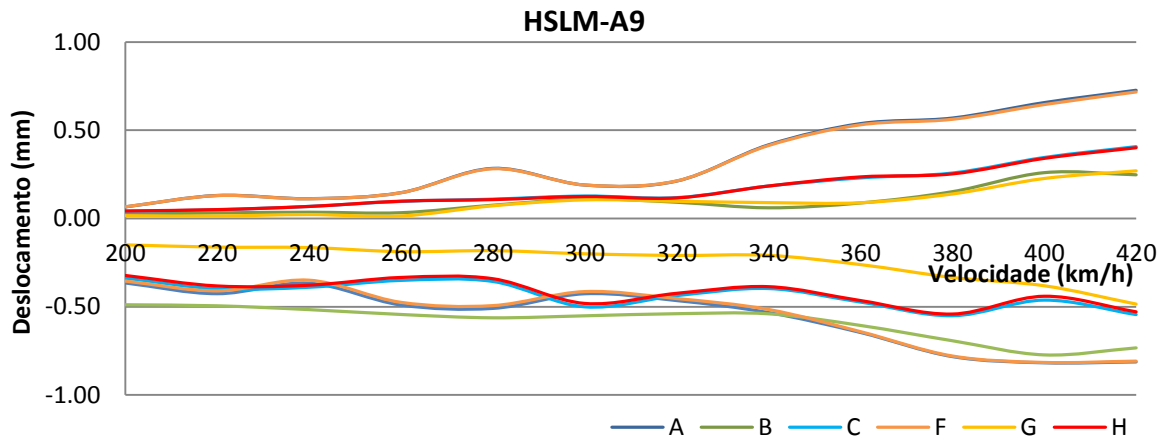


Fig. 88 – Deslocamentos máximos positivos e negativos para cada secção a analisar a) Deslocamentos verticais
b) Deslocamentos horizontais

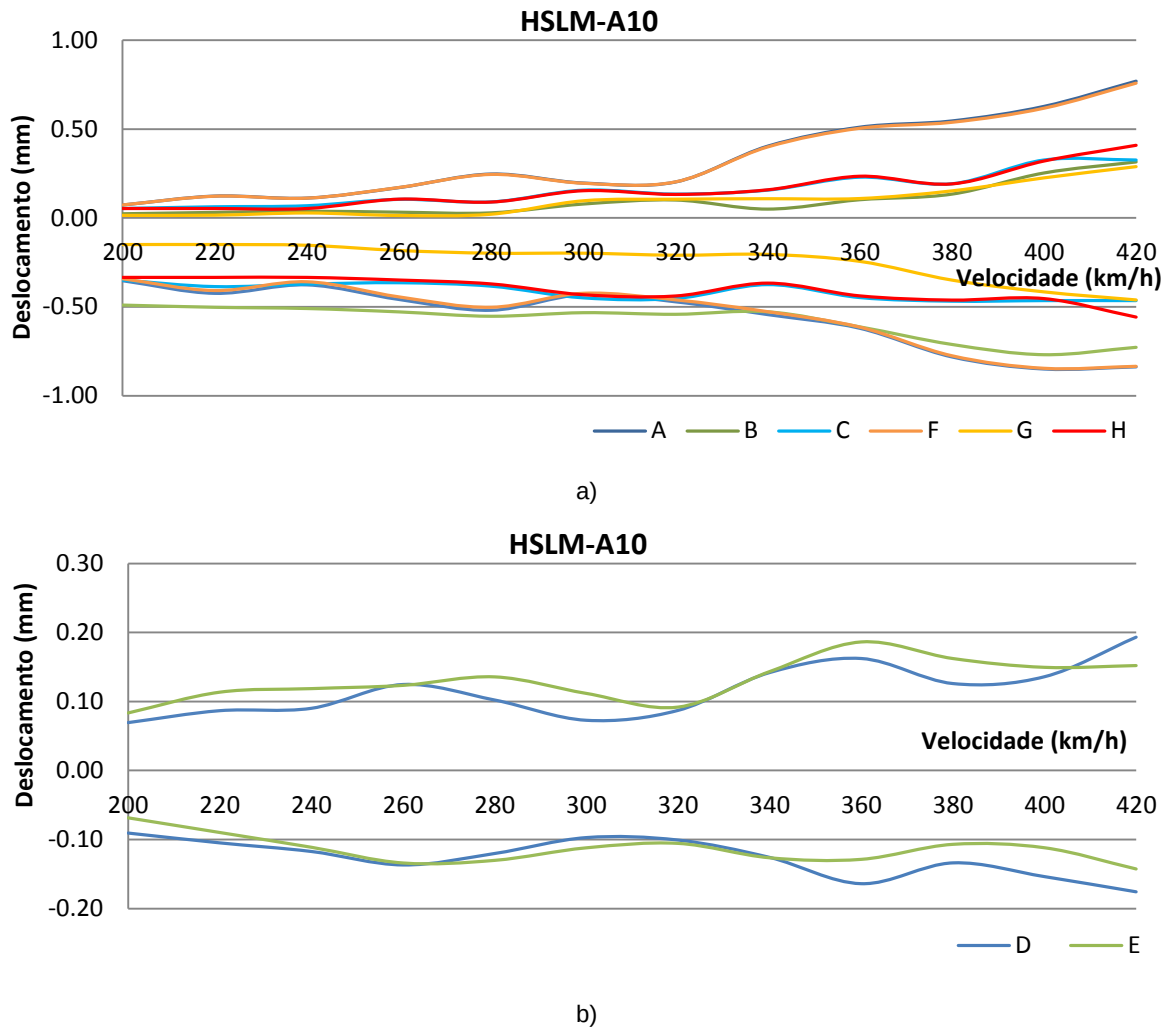


Fig. 89 – Deslocamentos máximos positivos e negativos para cada secção a analisar a) Deslocamento vertical b) Deslocamento horizontal

Os deslocamentos máximos positivos e negativos para o modelo HSLM-A9 ocorrem na secção A, 0,726 e -0,813 mm respectivamente. Na Fig. 90 são apresentados os deslocamentos para esta secção às velocidades de 200, 320 e 420 km/h, percebendo assim a forma como a velocidade influencia esta grandeza. O aumento da velocidade implica o aumento dos deslocamentos, atingido o máximo em diferentes instantes para as respectivas velocidades.

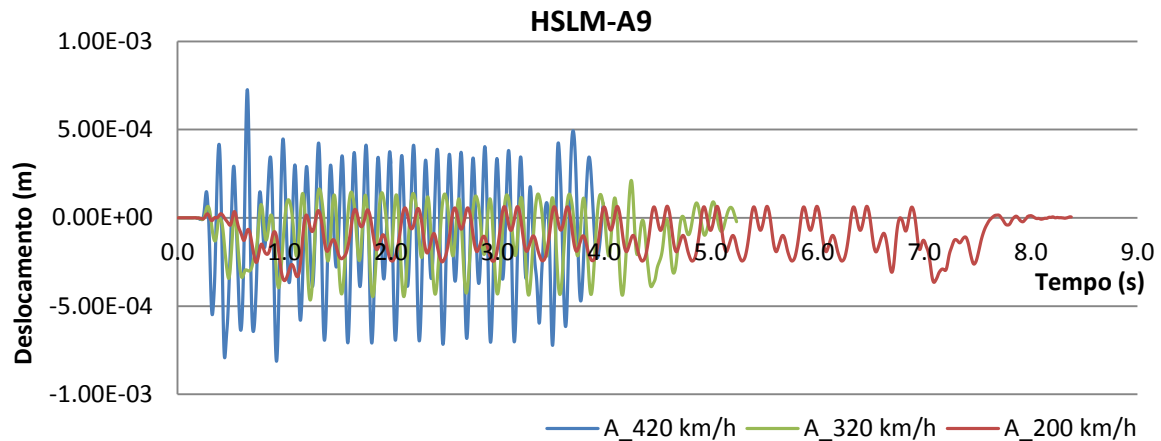
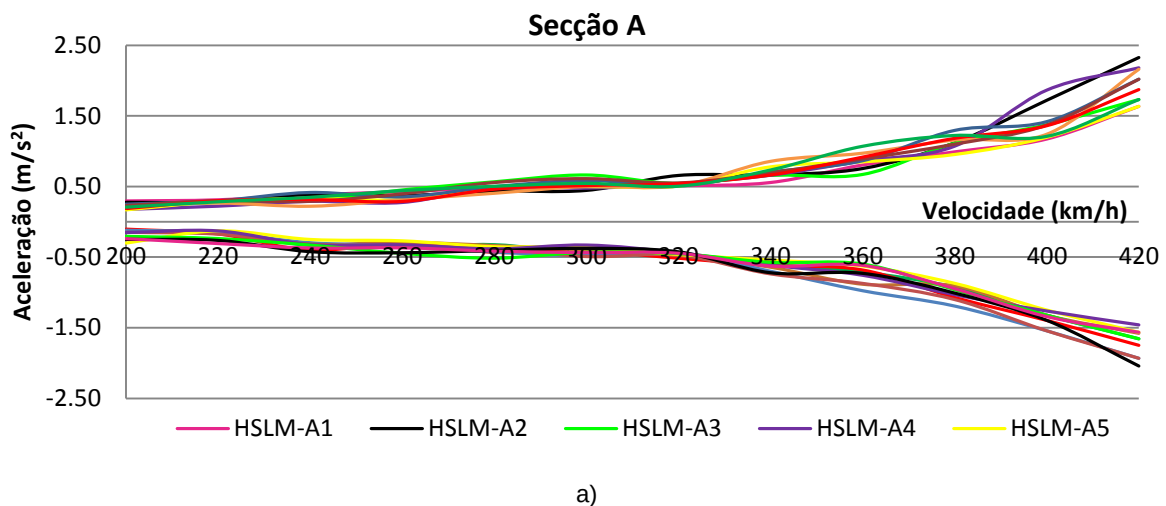


Fig. 90 – Deslocamento na secção A para a velocidade de 200, 320 e 420 km/h

6.2.2.2. ACELERAÇÕES NA BOX CULVERT

Neste ponto é feita uma análise à variação das acelerações em função da velocidade de circulação dos diversos modelos de carga dinâmicos, estas vão ser retiradas nas secções apresentadas na Fig. 85.

É de notar que as acelerações verticais estão limitadas nas estruturas em função do tipo de via. No caso de vias balastradas este limite tem o intuito de salvaguardar os fenómenos de instabilidade na camada de balastro. Estes podem induzir uma perda de resistência lateral da via, este valor é limitado a $3,5 \text{ m/s}^2$ (EN1991-2, 2003). Como foi referido no ponto anterior apenas serão apresentados os resultados para os modelos de carga dinâmica HSLM-A9 e A10. Na Fig. 91 é apresentada a aceleração induzida em duas secções (A e H) por todos os modelos de carga estudados. Concluindo que estes dois modelos se apresentam como os mais gravosos para a estrutura na generalidade das secções, sendo apresentados os restantes gráficos comparativos no Anexo A9.2.



a)

Fig. 91 - Comparação de acelerações entre modelos de carga para a secção A (a) e para a secção H (b))

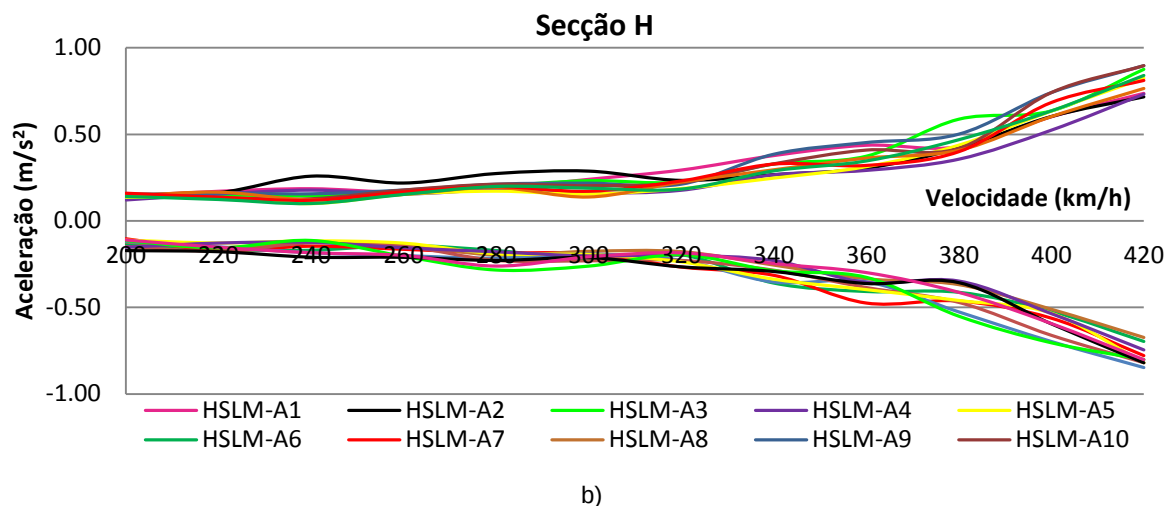


Fig. 91 - Comparação de acelerações entre modelos de carga para a secção A (a) e para a secção H (b)
(continuação)

Na Fig. 92 e Fig. 93 são apresentados os valores máximos positivos e negativos das acelerações. Verificando-se que estas tendem a aumentar com o aumento da velocidade, sendo este aumento mais acentuado para velocidades superiores a 340 km/h, para velocidades mais pequenas não se observam crescimentos acentuados. As acelerações máximas são atingidas para a velocidade de 420 km/h. É de notar que o limite máximo das acelerações verticais é cumprido em todos os pontos analisados. No Anexo A6 são apresentados todos os valores máximos positivos e negativos para as várias secções em função de cada velocidade e para cada comboio.

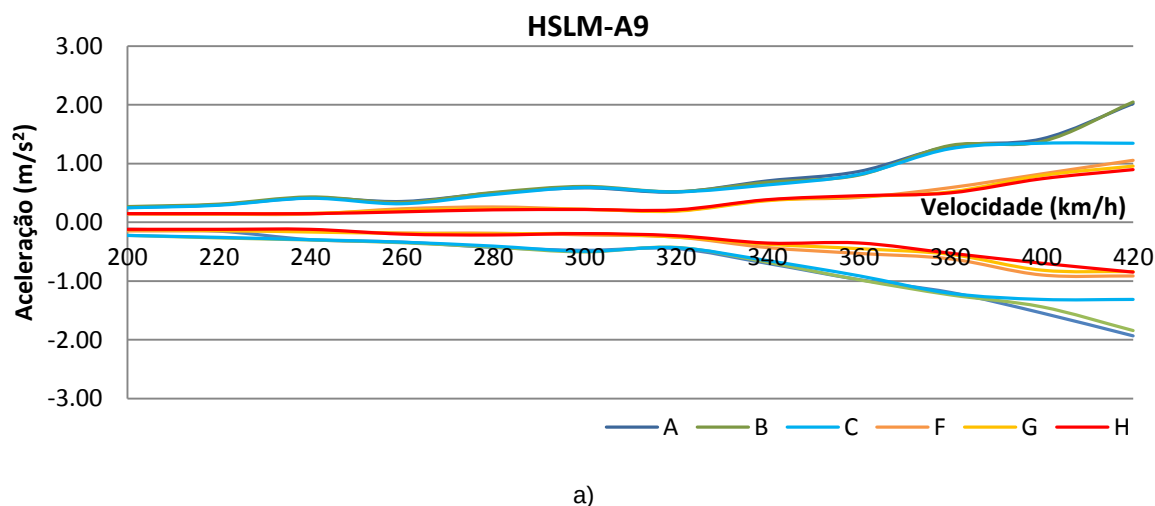


Fig. 92 – Acelerações máximas positivas e negativas para cada secção a analisar a) Acelerações verticais b) Acelerações horizontais

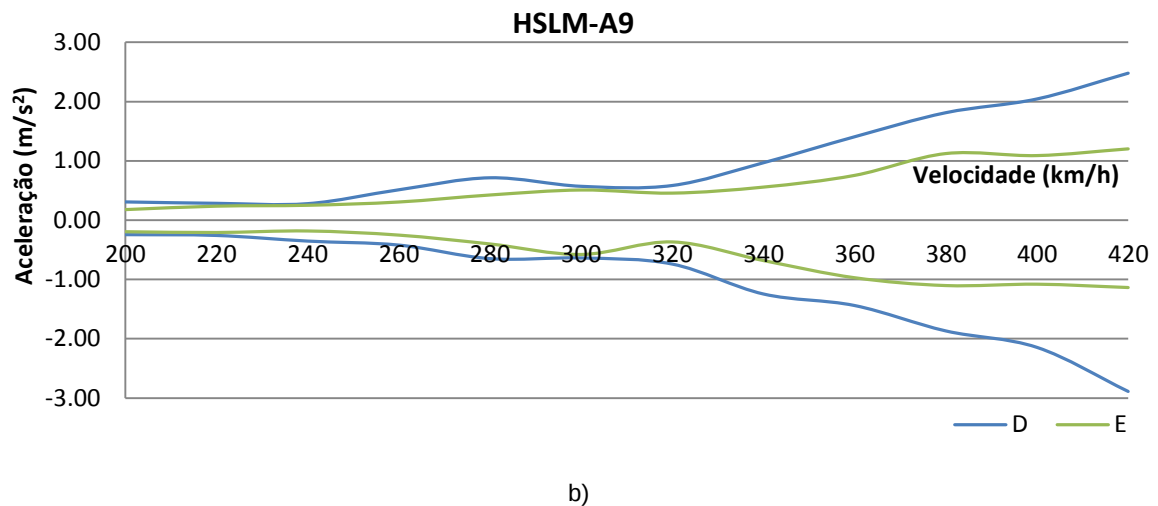


Fig. 92 – Acelerações máximas positivas e negativas para cada secção a analisar a) Acelerações verticais b) Acelerações horizontais (continuação)

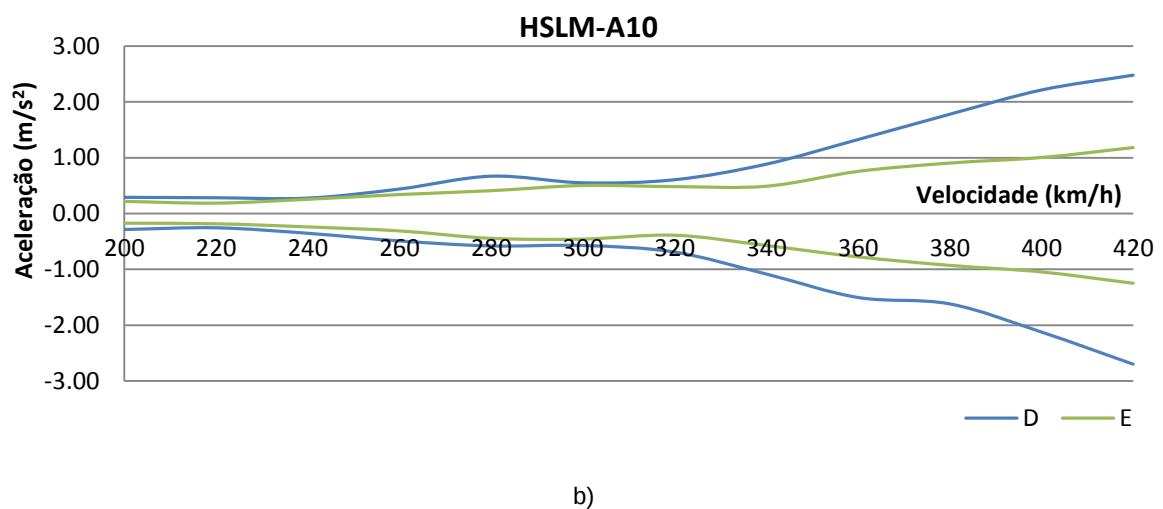
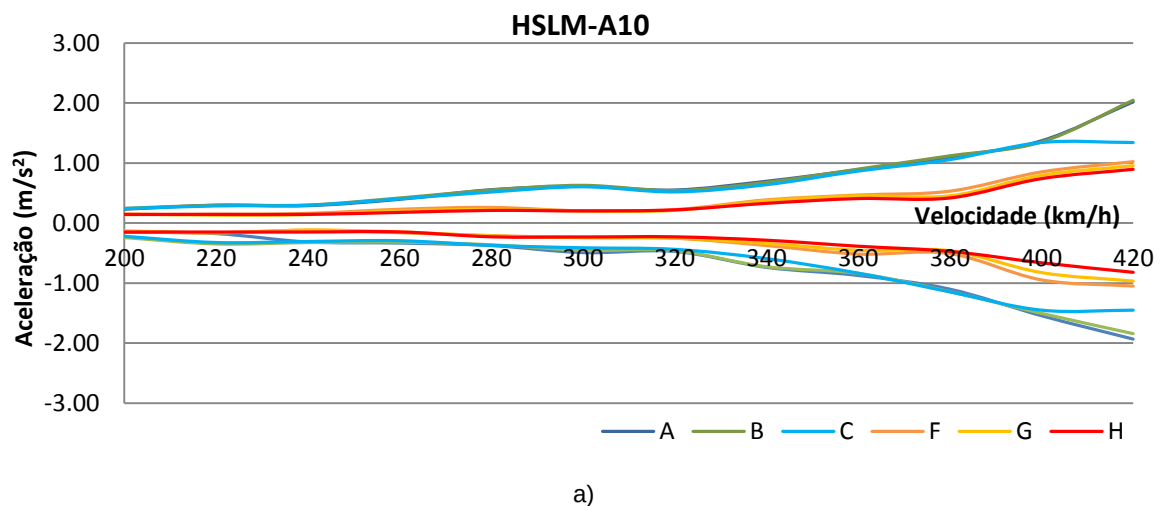


Fig. 93 – Acelerações máximas positivas e negativas nas secções a analisar a) Acelerações verticais b) Acelerações horizontais

Na figura Fig. 94 é feita uma comparação entre as acelerações verificadas para diferentes velocidades na mesma secção (A) e modelo de carga. Pela análise da figura é perceptível que as velocidades influenciam significativamente as acelerações, logo um aumento de velocidade aumenta a amplitude de resposta, estando esta implicitamente ligada ao aumento das acelerações.

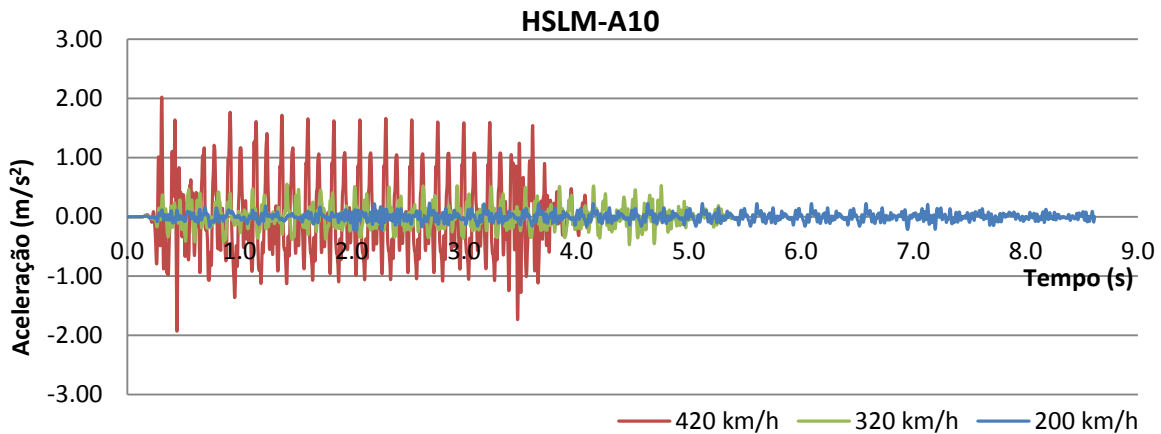
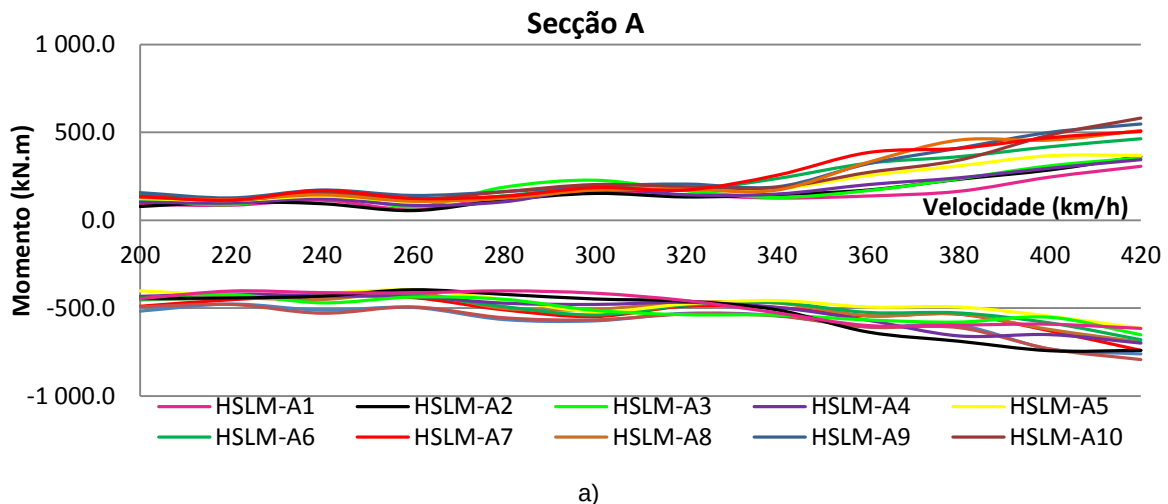


Fig. 94 – Aceleração para diferentes velocidades na secção A, para o modelo de carga HSLM-A10

6.2.2.3. MOMENTOS FLECTORES NA BOX CULVERT

Na Fig. 95 são apresentados os momentos flectores relativos a duas secções exemplo (A e H) para todos os comboios, verificando-se que os modelos HSLM-A9 e A10 são os mais gravosos na generalidade para a estrutura como se pode constatar na figura. No Anexo A9.3 são apresentados os restantes gráficos comparativos de momentos para todas as secções em função de cada comboio.



a)

Fig. 95 - Comparação de momentos entre modelos de carga para a secção A (a)) e para a secção H (b))

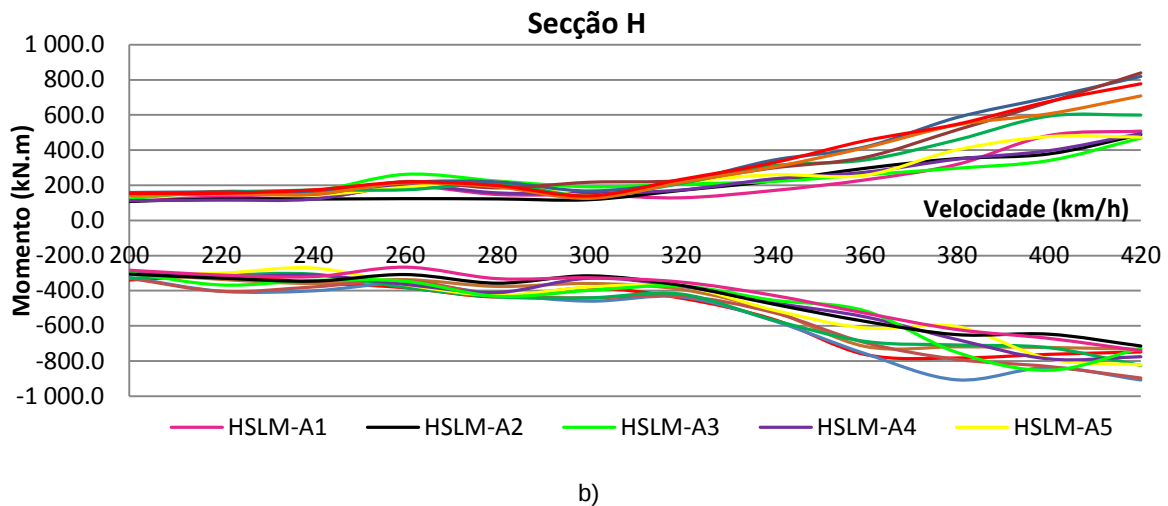


Fig. 95 - Comparação de momentos entre modelos de carga para a secção A (a)) e para a secção H (b))
(continuação)

Como as secções D e E representam a zona das rótulas estas não irão apresentar momentos, pois este é nulo nestas secções. Pela análise da Fig. 96 podemos concluir que os momentos tal como os deslocamentos e a acelerações também são influenciados pelo aumento da velocidade de circulação. Estes mantem-se mais ou menos constantes até à velocidade de 320 km/h em todas as secções, atingindo o máximo a 420 km/h na generalidade. À excepção do ponto C que apresenta o seu máximo para a velocidade de 380 km/h. Os momentos máximos positivos e negativos são apresentados no Anexo A7, bem como os gráficos comparativos entre secções em função da velocidade de circulação.

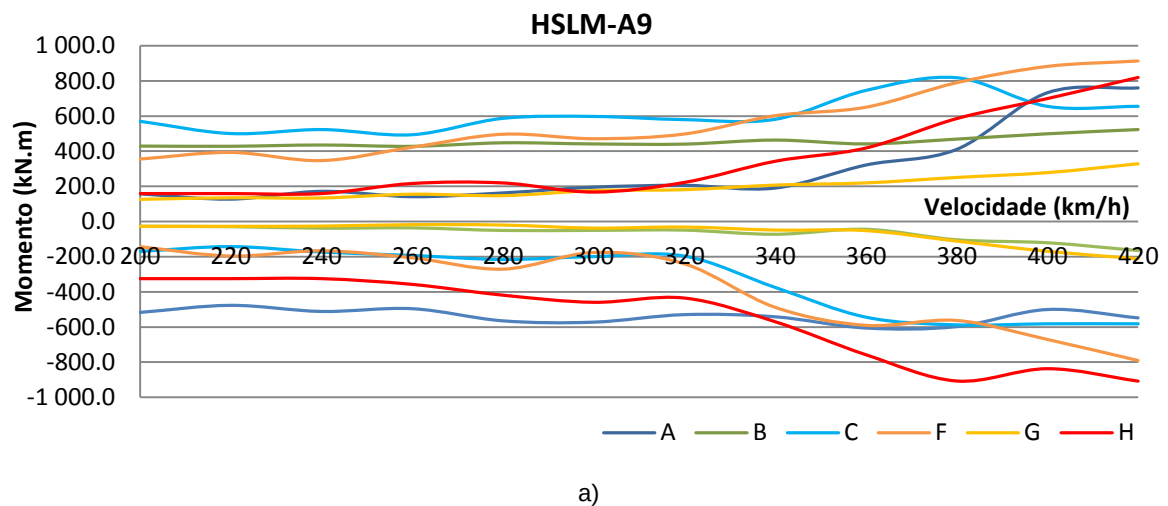


Fig. 96 – Momentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar a) HSLM-A9 b) HSLM-A10

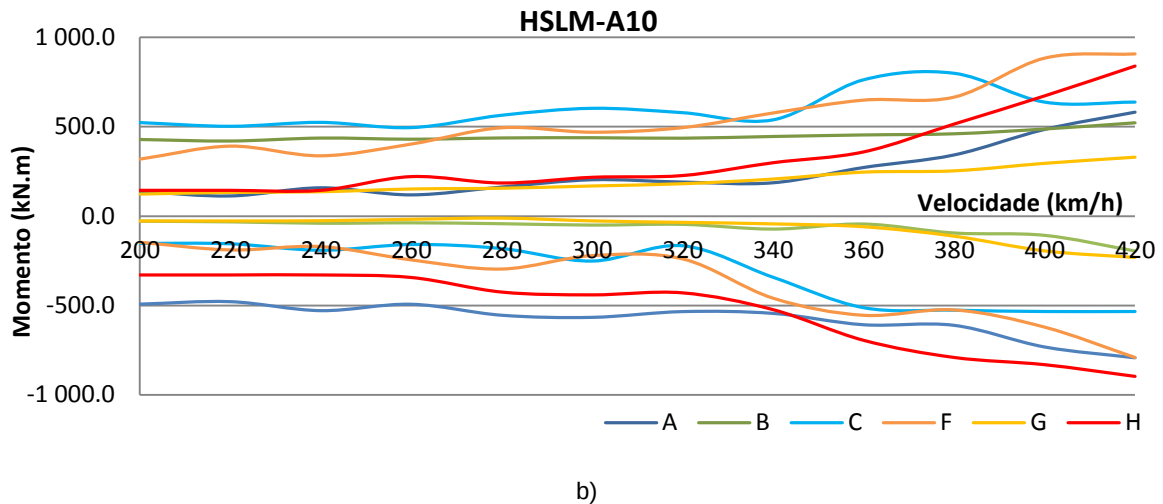


Fig. 96 – Momentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar a) HSLM-A9 b) HSLM-A10 (continuação)

A Fig. 97 mostra a evolução dos momentos para o modelo de carga HSLM-A10, para três velocidades distintas. Podemos concluir que os momentos aumentam com o aumento da velocidade, sendo mais significativo este fenómeno a partir dos 360 km/h pois para velocidades inferiores este mantém-se mais ou menos constante, atingindo o seu máximo em diferentes instantes de tempo (Fig. 97 a)).

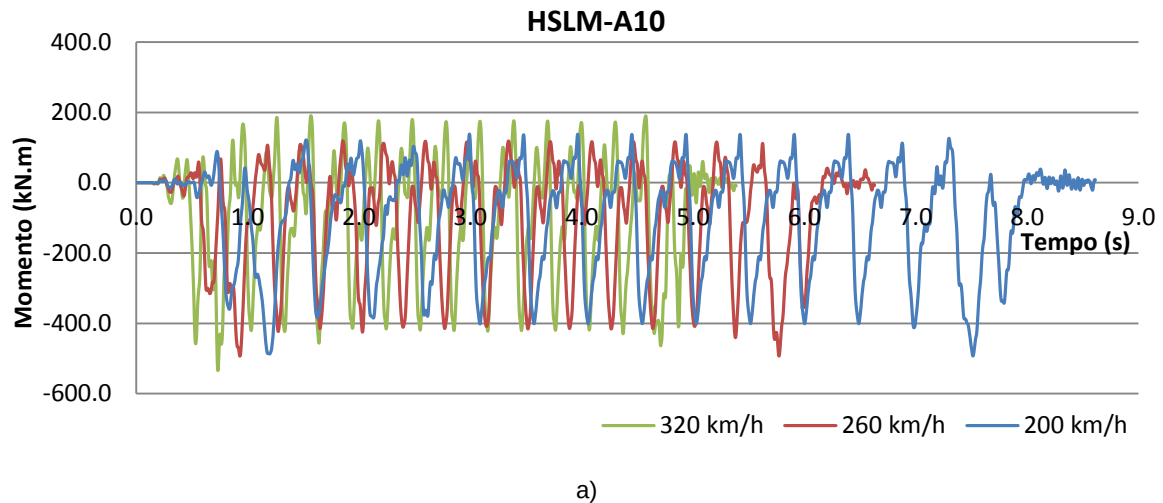


Fig. 97– Momentos para diferentes velocidades na secção A, para o modelo de carga HSLM-A10 (a) e b))

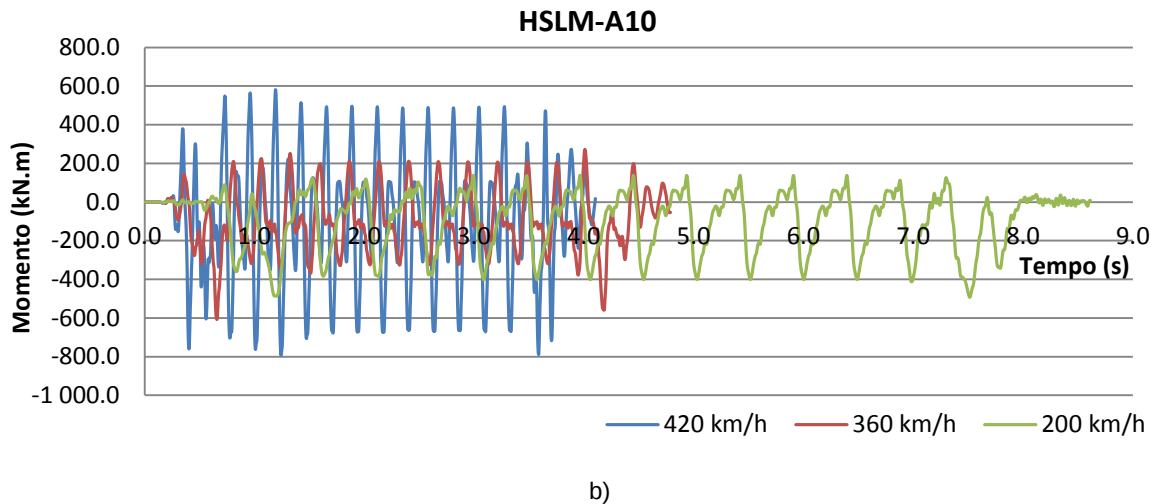


Fig. 97 – Momentos para diferentes velocidades na secção A, para o modelo de carga HSLM-A10 (a) e b))
(continuação)

6.2.2.4. ESFORÇO TRANSVERSO NA BOX CULVERT

O esforço transverso foi retirado em todas as secções em estudo, sendo que nas secções D e E este é mais reduzido que na generalidade das secções. Neste ponto serão apresentados os modelos de carga HSLM-A9 e A10, pois revelaram-se os mais condicionantes para a estrutura no que diz respeito ao esforço transverso induzido. Como se pode constatar na Fig. 98 onde podemos observar a evolução dos esforços transversos em dois pontos distintos (A e H) para os diferentes modelos de carga analisados. No Anexo A9.4 são apresentados os gráficos comparativos de todas as secções para todos os comboios.

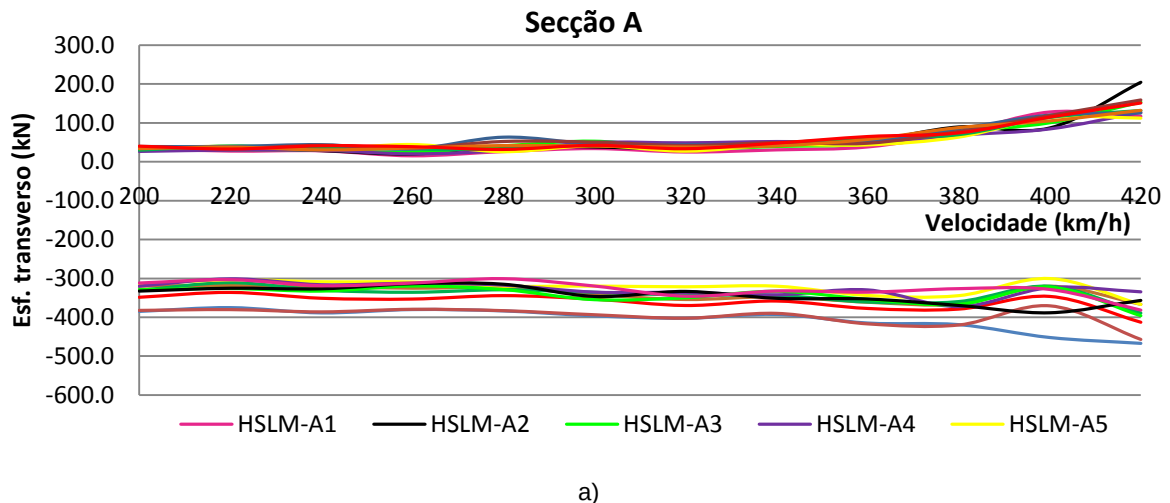


Fig. 98 - Comparação dos esforços transversos entre modelos de carga para a secção A (a)) e para a secção H (b))

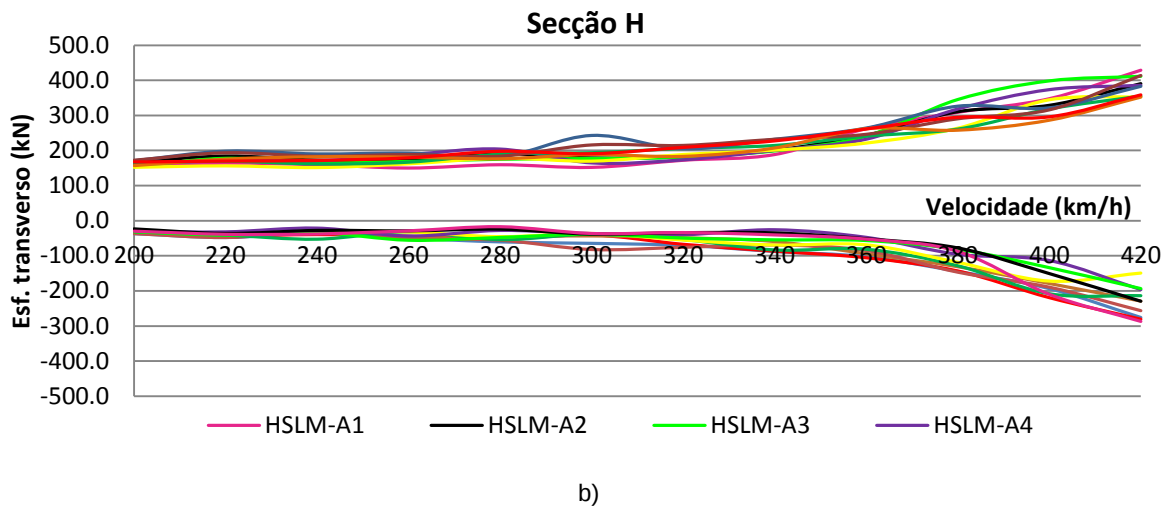


Fig. 98 - Comparação dos esforços transversos entre modelos de carga para a secção A (a)) e para a secção H (b)) (continuação)

Como se pode ver na Fig. 99 e Fig. 100 os esforços tem tendência a aumentar com o aumento da velocidade atingindo o seu máximo para a velocidade de circulação de 420 km/h. Para velocidades entre os 200 e os 340 km/h as variações são muito pequenas, mantendo-se até em algumas secções esforços constantes. Pela análise da figura concluímos que os esforços transversos máximos ocorrem no ponto A. No que diz respeito aos esforços transversos na secção D e E pode-se dizer que é significativamente mais pequeno que nas restantes secções apesar do gráfico apresentar a mesma tendência, ou seja, os esforços aumentam com o aumento da gama das velocidades, apresentado um esforço transversal máximo no ponto D. Os máximos esforços positivos e negativos são exibidos no Anexo A8 em função das respectivas velocidades de circulação para cada secção.

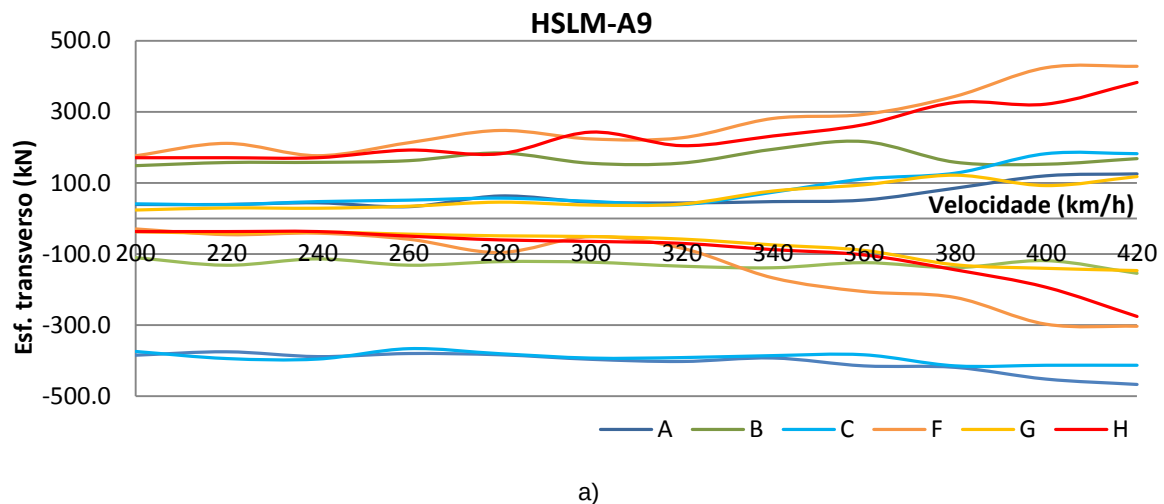


Fig. 99 – Esforço transversal máximo positivo e negativo para cada uma das secções a analisar a) Esf. transversal vertical b) Esf. transversal horizontal

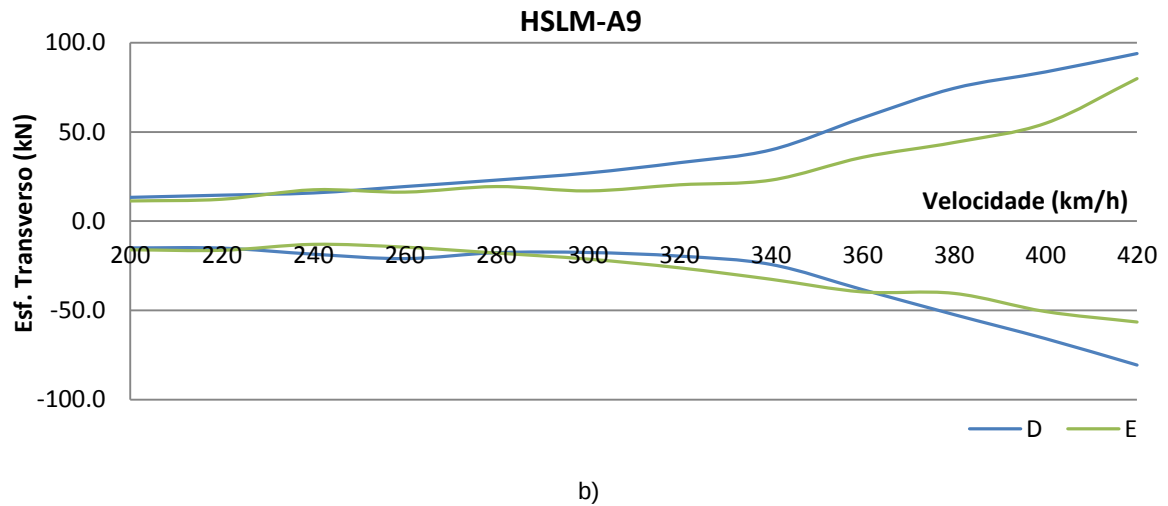


Fig. 99 – Esforço transverso máximo positivo e negativo para cada uma das secções a analisar a) Esf. transverso vertical b) Esf. transverso horizontal (continuação)

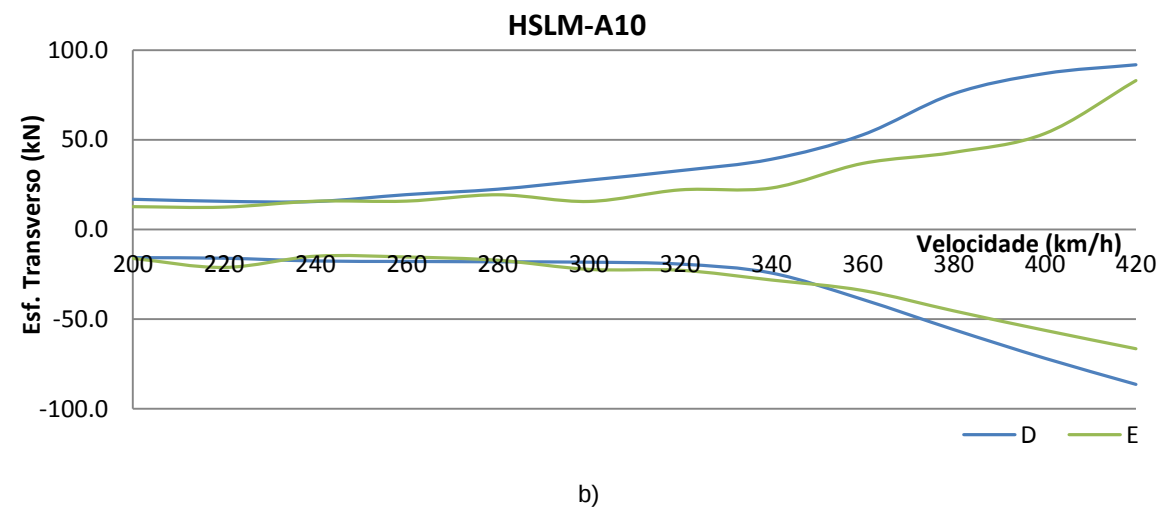
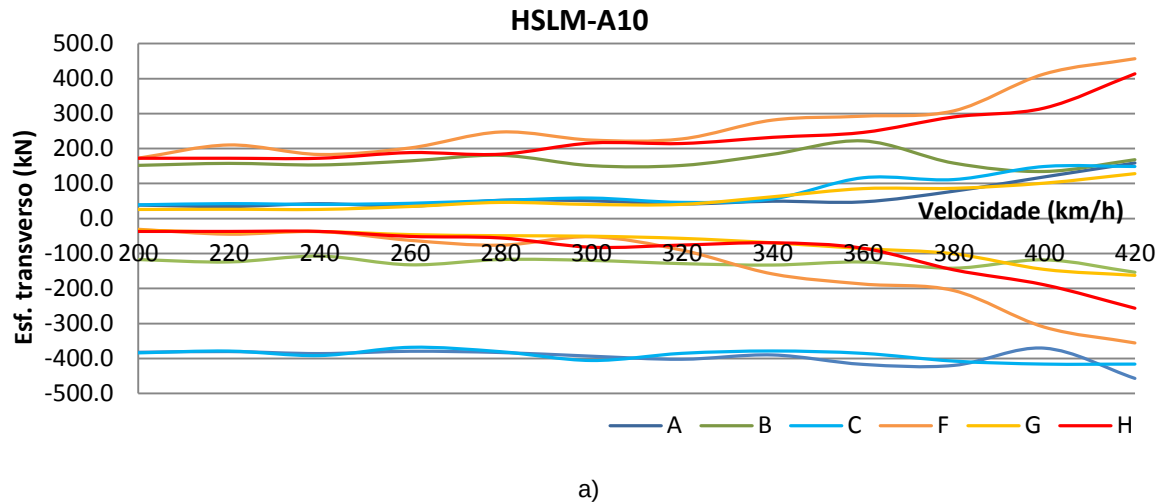


Fig. 100 – Esforço transverso máximo positivo e negativo para cada secção a analisar a) Esf. transverso vertical b) Esf. transverso horizontal

Depois de analisados os esforços nos vários pontos para os modelos HSLM-A9 e A10 é apresentada na Fig. 101 uma evolução dos esforços transversos em função do tempo para diferentes velocidades. Será tomado como exemplo o modelo de carga HSLM-A10, tal como nas outras grandezas estudadas, esta também varia em função da velocidade. Os esforços transversos têm tendência a agravar-se quando a velocidade aumenta, mas não se verifica uma variação tão elevada como nos momentos flectores.

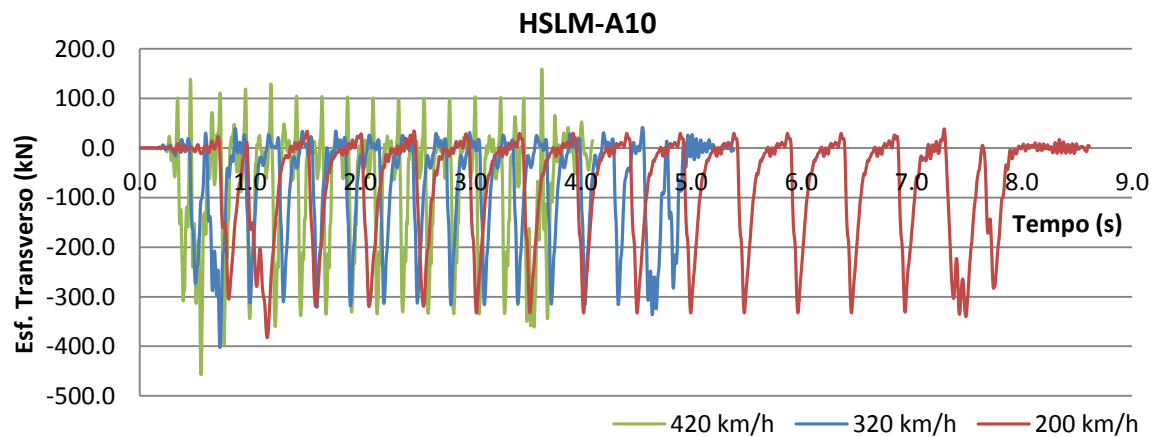


Fig. 101 – Esforços transversos para diferentes velocidades na secção A, para o modelo de carga HSLM-A10

7

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES GERAIS

O principal objectivo deste trabalho é estudar os efeitos dinâmicos induzidos nas passagens inferiores pré-fabricadas a linhas de alta velocidade quando solicitadas pelos modelos de carga dinâmicos (HSLM-A) descritos na norma EN 1991-2, (2003). Para se realizar esta análise foi desenvolvido um modelo de elementos finitos a duas dimensões em estado plano de tensão, tendo por base as soluções de transição propostas pela ADIF. A estrutura analisada é do tipo box culvert com uma secção rectangular, de 10,20 metros de largura por 8,20 de altura.

Na modelação da via foi tido em consideração o estudo desenvolvido por Nóbrega, (2010) tomando algumas opções do mesmo. Concluído o primeiro modelo foi feita uma análise a 420 km/h onde se percebeu que este não era viável do ponto de vista temporal, e pela dificuldade da obtenção dos esforços pretendidos para o estudo em causa, pois na modelação inicial da estrutura foram utilizados elementos de estado plano de tensão. Posto isto, foram efectuadas algumas alterações no modelo inicialmente desenvolvido por forma a permitir que este estudo se desenvolva em tempo útil e que facilite a obtenção da resposta dinâmica induzida na estrutura. Estas alterações concretizaram-se com a utilização de elementos de viga na modelação da estrutura, assim como a utilização de uma malha menos refinada. O desenvolvimento deste modelo final foi executado por fases onde se comparam constantemente as respostas dinâmicas obtidas para a mesma velocidade em diferentes modelos, sendo executado apenas no modelo final um estudo de sensibilidade por forma a perceber como as respostas dinâmicas são influenciadas pelo incremento de tempo adoptado, tendo como referência 0,002 s. Concluindo que a resposta dinâmica obtida é bastante próxima de modelo para modelo e que o tempo “ganho” nas análises efectuadas justifica as simplificações adoptadas bem como o incremento de tempo de 0.003 s.

Depois de concluída a modelação foi efectuada a análise dinâmica da estrutura para velocidades dos 200 aos 420 km/h com incrementos de 20 km/h para todos os modelos de carga HSLM-A, sendo retirados os deslocamentos, acelerações, momentos flectores e esforços transversos nas secções da estrutura mais condicionantes do ponto de vista estrutural. Verificando-se que na generalidade das secções estas grandezas são agravadas pelo aumento da velocidade atingindo a seu máximo para 420 km/h, pode-se dizer ainda que todas elas se mantem mais ou menos constantes para velocidades inferiores a 320 km/h, isto porque os maiores efeitos ressonantes começam a surgir a partir desta velocidade.

Os deslocamentos induzidos pelos modelos de carga HSLM-A1, A2, A9 e A10 são os mais gravosos na maioria das secções, concluindo-se que os maiores deslocamentos se encontram nas secções A, B, e C sendo estas as secções de entrada (A), saída (C) e de meio vão (B), justifica-se o facto do ponto de

entrada ter um elevado deslocamento pelo facto da estrutura apresentar um assentamento bastante significativo dentro da gama dos deslocamentos induzidos e no caso da secção A pelo primeiro impacto da roda do comboio ao passar do aterro para a estrutura. A secção B apresenta um deslocamento elevado como era de esperar, pois localiza-se na travessa superior da estrutura a meio vão.

As acelerações tal como os deslocamentos aumentam significativamente à medida que a velocidade aumenta para todas as secções analisadas. O modelo de carga que induz as maiores acelerações na travessa superior da estrutura é o HSLM-A2, sendo a máxima na secção B com o valor de $2,29 \text{ m/s}^2$. Isto pode ser justificado pelo facto da velocidade crítica ser muito baixa devido ao menor comprimento das carruagens neste modelo.

No que diz respeito aos momentos flectores podemos concluir que os modelos HSLM-A9 e A10 se apresentam como os mais gravosos na maioria das secções analisadas. Tal como foi concluído anteriormente o momento flector agrava-se com o aumento da velocidade. As secções mais solicitadas são as que se localizam nas extremidades da estrutura (A; C; F; H) isto porque é uma estrutura contínua, o que leva a que as maiores solicitações surjam nas secções de apoio.

Os esforços transversos apresentam-se como a grandeza que se mantém mais ou menos constante no conjunto de todas as velocidades estudadas, exibindo um ligeiro aumento a partir dos 360 km/h na globalidade das secções. Constatando-se que é na secção A que surge o maior esforço transversal, quando a estrutura é solicitada pelo modelo de carga dinâmica HSLM-A9 aos 420 km/h.

Face ao conjunto de resultados para os vários modelos de carga e velocidades de circulação podemos concluir que os modelos HSLM-A1, HSLM-A2, HSLM-A9 e HSLM-A10 se apresentam como os mais gravosos para a estrutura. No caso dos modelos HSLM-A9 e A-10 porque se apresentam com a maior força por eixo (210 kN) e no caso do HSLM-A1 e A2 porque estão relativamente próximos da velocidade crítica, isto é perceptível nas secções da travessa superior da estrutura (A; B; C) a partir dos 320 km/h. Concluímos também que em todos os comboios analisados as acelerações cumprem o limite disposto na norma EN 1991-2, (2003), logo esta estrutura teria um bom desempenho numa linha interoperável.

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Para desenvolvimentos futuros deste trabalho são apresentadas algumas sugestões, visto que não era possível realizar em tempo útil tantas análises.

- Criação de um modelo a três dimensões para calibrar e validar o modelo desenvolvido;
- Comparação das respostas dinâmicas com o modelo de carga estático LM71 apresentado na EN 1991-2, (2003);
- Realização de várias análises de sensibilidade, alterando os módulos de deformabilidade do solo de fundação, material tratado e granular por forma a perceber a influência desta grandeza na resposta dinâmica da estrutura.

BIBLIOGRAFIA

- ADIF. (2006). *Instrucciones Y recomendaciones para redaccion de proyectos de plataforma*.
- Alves, João. (2010). *Avaliação de Dimensionamento da Subestrutura Ferroviária de Linhas de Alta Velocidade*, Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- Alves Ribeiro, C., Calçada, R., Delgado, R. (2008). *Efeitos dinâmicos em zonas de transição em vias férreas de alta velocidade*., XI Congresso Nacional de Geotecnia, IV Congresso Luso-Brasileiro de geotecnia, 7-11 Abril 2008. Coimbra.
- Chopra, Anil K. (1995). *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Englewood Cliffs: Prentice Hall International.
- CIARI, (2011). http://www.ciari.org/opiniao/alta_velocidade_feroviaria.htm. (28/05/2011).
- Coelho, Luís. (2008). *Blocos Técnicos em Infra-Estruturas Ferroviárias. Comportamento e Práticas Nacionais e Internacionais*, Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- Couto, F. (2008). *Sebenta da cadeira de Caminhos-de-ferro*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- CP, (2011). <http://www.cp.pt>. (27/05/2011).
- EN1991-2. (2003). *Action on Structures - Part 2: General Actions - Traffic loads on bridges*. Edited by E. C. f. S. (CEN). Brussels.
- Engenhariacivil.com, (2011). <http://www.engenhariacivil.com/box-culverts-analise-dimensionamento>. (15/06/2011).
- ERRI, D230.1. (1999). *Bridge ends. Embankment structure transition RP3. State of the art report*, European Rail Research Institute. Utrecht, Netherlands.
- Esvel, C. (2001). *Modern railway*, 2nd edition, MRT Productions. Zaltbommel.
- FARCIMAR, (2011). http://www.farcimar.pt/pre_fabricados_de_betao/box_culvert.html. (14/06/2011).
- Faria, Rui. (1994). *Avaliação de um comportamento sísmico de barragens de betão através de um modelo de dano contínuo*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- Ferreira, José Vítor Saavedra. (2009). *Efeitos dinâmicos em zonas de variação de rigidez da plataforma de vias férreas de alta velocidade*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto: [s. n.].
- Figueiredo, H; Calçada, R. e Delgado, R. (2009). *Aspectos Regulamentares no Cálculo de Pontes Ferróviárias em Linhas de Alta Velocidade*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- Fortunato, E. (2006). *Caracterização Físico-Mecânica de Plataformas Ferroviárias*., 9º Ciclo de Palestras em Engenharia Civil UNIC 2006, 3 de Maio de 2006. Lisboa.

- Fortunato, E., Paixão, A. (2009). *Novas soluções de superestrutura de via para alta velocidade ferroviária*, LNEC. Lisboa.
- Fortunato, Eduardo Manuel Cabrita. (2005). *Renovação de plataformas ferroviárias estudos relativos à capacidade de carga*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto: [s.n.].
- FreeFoto.com, (2011) <http://freefoto.com/preview/25-10-4/TGV-Duplex-train>. (06/06/2011).
- González, P., M. Cuadrado, and E. Romo 2006. *Small Structures in the Core (Nucleus) of the Embankment in High-speed Lines. Effects on the Variation of the global Stiffness of the Track and Design Recommendations*. in *Railway Foundations*, University of Birmingham.
- HANSON, (2011). <http://www.hansonsilo.com/culverts.php>. (14/06/2011).
- Jornal do Comércio, (2011). (<http://jcrs.uol.com.br/site/noticia.php?codn=44628&codni=3&codp=76>). (20/06/2011).
- jornal oexpresso, (2011). (<http://jornaloexpresso.wordpress.com/2010/11/28/desta-o-pessoal-da-comitativa-baiana-escapou>). (20/06/2011).
- Leykauf, G., Lechner, B. e Stahl, W. (2006). *Optimisation of track for high-speed*, Workshop Track for high-speed railways, 12-13 Outubro 2006. Porto.
- Lopes, João António. (2008). *Modelação dos efeitos dinâmicos em zonas de transição em vias ferroviárias de alta velocidade*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- Nóbrega, Sérgio. (2010). *Comportamento dinâmico de atravessamentos inferiores pré-fabricados em vias de alta velocidade*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- Pinto, Daniel Ramos. (2008). *Análise de passagens hidráulicas enterradas constituídas por box culvert*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- Plumey, S. (2007). *Interaction sol-structure dans le domaine des tranchées couvertes*, Faculté de L'Environnement Naturel, Architectural ey Construit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne.
- RAVE, (2010). <http://www.rave.pt/tabid/412/Default.aspx>. (29/05/2011).
- Ribeiro, Diogo. (2004). *Comportamento dinâmico de pontes sob acção de tráfego ferroviário a alta velocidade* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- Rocla, (2011). <http://www.rocla.com.au/Products.php?id=2>. (14/06/2011).
- Sang, P. (2000). *Comportamento e modelação numérica de estruturas enterradas de betão*, Departamento de Engenharia Civil, FEUP, Porto.
- Repeated Author. (2000). *Comportamento e modelação numérica de estruturas enterradas de betão*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.
- Sateba, (2011). <http://www.sateba.com/article14.html>. (02/06/2011).
- Silva, Hugo. (2010). *Transições Aterro-Ponte em Vias Férreas de Alta Velocidade*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.

SNCF. (2002). *Remblais contigues aux maçonneries, Livre 1: A - Conception, article 8.1.*

Suyu, (2011). (<http://www.sh-suyu.com/enChanpzs.aps?ClassId=70&Path=39|32&ParentId=39>). (18/06/2011).

ThyssenKrupp,
(2011). http://www.tkgftgleistechnik.de/aktuelles/news/newsdetails/article/die_schienen_uic_60_e1_und_60_e2_zum_verwechseln_aehnlich.html. (31/05/2011).

UIC, (2008). *UIC Code 719R: Earthworks and track bed for railway lines, International Union of Railways.*

Vossloh, (2011). http://www.vossloh-south-america.com/cms/pt/rail_infrastructure/fasteners_for_all_applications/system_300/system_300.html. (31/05/2011).

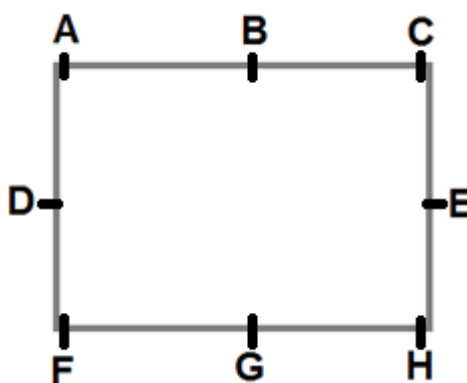
webtranspo, (2011). (<http://webtranspo.com.br/ferroviario/6968-cbtu-destina-r-320-mil-para-recuperrar-ferrovia>). (31/05/2011).

Wikipédia, (2011). http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Talgo_350.jpg. (06/06/2011).

Wordpress, (2011). <http://vadetrem.wordpress.com>. (06/06/2011).

Anexo A1

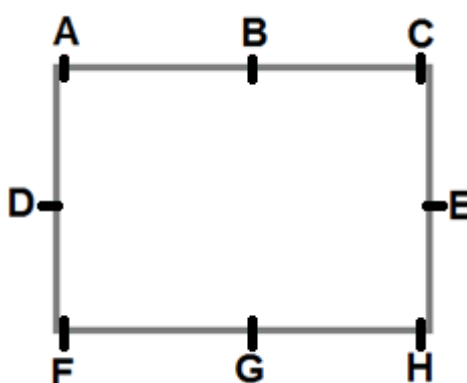
COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO I E II (SECÇÕES A; B; C; F; G; H)



Velocidade 420 km/h					
Secções		Modelo I		Modelo II	
		Máximo (+)	Máximo (-)	Máximo (+)	Máximo (-)
A	Deslocamento (m)	7,381E-04	-9,061E-04	5,229E-04	-7,933E-04
	Aceleração (m/s ²)	3,405E+00	-2,041E+00	2,508E+00	-2,283E+00
B	Deslocamento (m)	2,360E-04	-5,721E-04	2,602E-04	-6,305E-04
	Aceleração (m/s ²)	2,861E+00	-1,658E+00	2,522E+00	-2,545E+00
C	Deslocamento (m)	4,693E-04	-6,543E-04	4,723E-04	-6,544E-04
	Aceleração (m/s ²)	3,221E+00	-1,886E+00	2,451E+00	-2,653E+00
F	Deslocamento (m)	7,188E-04	-8,894E-04	5,328E-04	-7,774E-04
	Aceleração (m/s ²)	1,279E+00	-1,837E+00	1,063E+00	-1,196E+00
G	Deslocamento (m)	2,587E-04	-4,049E-04	3,855E-04	-4,074E-04
	Aceleração (m/s ²)	8,515E-01	-1,370E+00	1,072E+00	-1,135E+00
H	Deslocamento (m)	4,489E-04	-6,302E-04	4,713E-04	-6,414E-04
	Aceleração (m/s ²)	9,887E-01	-1,669E+00	1,015E+00	-1,260E+00

Anexo A2

COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO II E III (SECÇÕES A; B; C; D ; E; F; G; H)

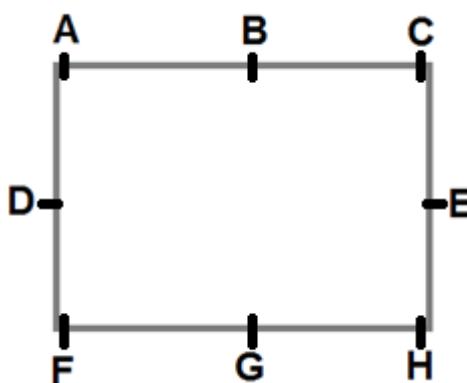


Velocidade 420 km/h					
Secções		Modelo II		Modelo III	
		Máximo (+)	Máximo (-)	Máximo (+)	Máximo (-)
A	Deslocamento (m)	5,229E-04	-7,933E-04	5,225E-04	-7,927E-04
	Aceleração (m/s ²)	2,508E+00	-2,283E+00	2,507E+00	-2,286E+00
B	Deslocamento (m)	2,602E-04	-6,305E-04	2,599E-04	-6,304E-04
	Aceleração (m/s ²)	2,522E+00	-2,545E+00	2,520E+00	-2,548E+00
C	Deslocamento (m)	4,723E-04	-6,544E-04	4,382E-04	-6,531E-04
	Aceleração (m/s ²)	2,451E+00	-2,653E+00	2,448E+00	-2,656E+00
D	Deslocamento (m)	8,044E-04	-8,650E-04	8,047E-04	-8,648E-04
	Aceleração (m/s ²)	2,030E+00	-1,701E+00	2,027E+00	-1,699E+00
E	Deslocamento (m)	9,714E-04	-9,728E-04	9,720E-04	-9,729E-04
	Aceleração (m/s ²)	1,575E+00	-1,355E+00	1,567E+00	-1,347E+00
F	Deslocamento (m)	5,328E-04	-7,774E-04	5,326E-04	-7,768E-04
	Aceleração (m/s ²)	1,063E+00	-1,196E+00	1,060E+00	-1,195E+00
G	Deslocamento (m)	3,855E-04	-4,074E-04	3,854E-04	-4,071E-04
	Aceleração (m/s ²)	1,072E+00	-1,135E+00	1,069E+00	-1,134E+00
H	Deslocamento (m)	4,713E-04	-6,414E-04	4,372E-04	-6,401E-04

Aceleração (m/s ²)		1,015E+00	-1,260E+00	1,013E+00	-1,258E+00
Esforços		Modelo II		Modelo III	
		Máximo (+)	Máximo (-)	Máximo (+)	Máximo (-)
A	Momento (N.m)	5,030E+05	-6,629E+05	5,014E+05	-6,627E+05
	Esf. Transverso (N)	1,171E+05	-4,091E+05	1,166E+05	-4,092E+05
B	Momento (N.m)	5,739E+05	-1,399E+05	5,736E+05	-1,398E+05
	Esf. Transverso (N)	2,170E+05	-1,885E+05	2,216E+05	-1,837E+05
C	Momento (N.m)	6,525E+05	-8,692E+05	6,508E+05	-8,675E+05
	Esf. Transverso (N)	1,357E+05	-4,916E+05	1,351E+05	-4,917E+05
D	Momento (N.m)	7,337E+04	-7,128E+04	7,340E+04	-7,128E+04
	Esf. Transverso (N)	8,599E+04	-1,016E+05	8,580E+04	-1,018E+05
E	Momento (N.m)	6,613E+04	-8,275E+04	6,940E+04	-8,686E+04
	Esf. Transverso (N)	9,496E+04	-1,033E+05	2,762E+05	-2,163E+05
F	Momento (N.m)	9,427E+05	-8,022E+05	9,392E+05	-7,996E+05
	Esf. Transverso (N)	5,495E+05	-3,307E+05	5,495E+05	-3,299E+05
G	Momento (N.m)	3,007E+05	-4,012E+05	3,001E+05	-4,007E+05
	Esf. Transverso (N)	1,252E+05	-1,314E+05	1,248E+05	-1,309E+05
H	Momento (N.m)	9,541E+05	-8,917E+05	9,505E+05	-8,918E+05
	Esf. Transverso (N)	3,982E+05	-3,977E+05	3,985E+05	-3,970E+05

Anexo A3

COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO III E IV (SECÇÕES A; B; C; F; G; H)



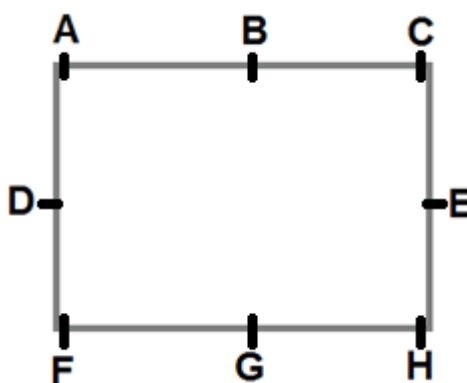
Velocidade 380 km/h					
Secções		Modelo III		Modelo IV	
		Máximo (+)	Máximo (-)	Máximo (+)	Máximo (-)
A	Deslocamento (m)	4,375E-04	-7,446E-04	5,771E-04	-7,808E-04
	Aceleração (m/s ²)	1,244E+00	-1,389E+00	1,183E+00	-1,071E+00
B	Deslocamento (m)	2,685E-04	-7,260E-04	1,362E-04	-6,849E-04
	Aceleração (m/s ²)	1,234E+00	-1,342E+00	1,170E+00	-1,081E+00
C	Deslocamento (m)	3,574E-04	-5,430E-04	2,600E-04	-5,544E-04
	Aceleração (m/s ²)	1,287E+00	-1,300E+00	1,143E+00	-1,021E+00
F	Deslocamento (m)	4,348E-04	-7,380E-04	5,703E-04	-7,769E-04
	Aceleração (m/s ²)	7,274E-01	-5,976E-01	6,069E-01	-6,727E-01
G	Deslocamento (m)	2,497E-04	-2,946E-04	1,380E-04	-3,376E-04
	Aceleração (m/s ²)	7,014E-01	-5,891E-01	5,137E-01	-6,466E-01
H	Deslocamento (m)	3,534E-04	-5,396E-04	2,549E-04	-5,447E-04
	Aceleração (m/s ²)	6,667E-01	-5,950E-01	5,083E-01	-6,045E-01
Esforços		Modelo III		Modelo IV	
		Máximo (+)	Máximo (-)	Máximo (+)	Máximo (-)
A	Momento (N.m)	4,682E+05	-6,569E+05	4,287E+05	-5,596E+05
	Esf. Transverso (N)	1,142E+05	-3,741E+05	4,287E+05	-4,327E+05

B	Momento (N.m)	9,069E+04	-4,742E+05	7,861E+04	-4,726E+05
	Esf. Transverso (N)	1,379E+05	-1,272E+05	1,613E+05	-1,362E+05
C	Momento (N.m)	5,021E+05	-5,820E+05	6,092E+05	-8,256E+05
	Esf. Transverso (N)	1,144E+05	-4,009E+05	1,219E+05	-4,116E+05
F	Momento (N.m)	8,632E+05	-5,986E+05	7,971E+05	5,754E+05
	Esf. Transverso (N)	4,234E+05	-2,088E+05	3,495E+05	-2,165E+05
G	Momento (N.m)	1,356E+05	-2,881E+05	1,138E+05	-2,379E+05
	Esf. Transverso (N)	1,086E+05	-1,200E+05	1,158E+05	-1,278E+05
H	Momento (N.m)	8,549E+05	-7,197E+05	9,269E+05	-5,907E+05
	Esf. Transverso (N)	2,412E+05	-3,209E+05	1,554E+05	-3,357E+05

Velocidade 420 km/h					
Secções		Modelo III		Modelo IV	
		Máximo (+)	Máximo (-)	Máximo (+)	Máximo (-)
A	Deslocamento (m)	5,225E-04	-7,927E-04	7,279E-04	-8,161E-04
	Aceleração (m/s ²)	2,507E+00	-2,286E+00	1,928E+00	-1,818E+00
B	Deslocamento (m)	2,599E-04	-6,304E-04	2,527E-04	-7,466E-04
	Aceleração (m/s ²)	2,520E+00	-2,548E+00	1,918E+00	-1,728E+00
C	Deslocamento (m)	4,382E-04	-6,531E-04	4,110E-04	-5,406E-04
	Aceleração (m/s ²)	2,448E+00	-2,656E+00	1,833E+00	-1,551E+00
F	Deslocamento (m)	5,326E-04	-7,768E-04	7,185E-04	-8,124E-04
	Aceleração (m/s ²)	1,060E+00	-1,195E+00	9,848E-01	-9,917E-01
G	Deslocamento (m)	3,854E-04	-4,071E-04	2,742E-04	-4,804E-04
	Aceleração (m/s ²)	1,069E+00	-1,134E+00	9,795E-01	-9,768E-01
H	Deslocamento (m)	4,372E-04	-6,401E-04	4,054E-04	-5,252E-04
	Aceleração (m/s ²)	1,013E+00	-1,258E+00	9,026E-01	-9,206E-01
Esforços		Modelo III		Modelo IV	
		Máximo (+)	Máximo (-)	Máximo (+)	Máximo (-)
A	Momento (N.m)	5,014E+05	-6,627E+05	5,397E+05	-7,438E+05
	Esf. Transverso (N)	1,166E+05	-4,092E+05	-1,150E+05	-4,813E+05
B	Momento (N.m)	5,736E+05	-1,398E+05	4,845E+05	-1,485E+05
	Esf. Transverso (N)	2,216E+05	-1,837E+05	1,663E+05	-1,486E+05
C	Momento (N.m)	6,508E+05	-8,675E+05	6,349E+05	-7,034E+05
	Esf. Transverso (N)	1,351E+05	-4,917E+05	1,895E+05	-4,296E+05
F	Momento (N.m)	9,392E+05	-7,996E+05	9,166E+05	-7,684E+05
	Esf. Transverso (N)	5,495E+05	-3,299E+05	4,300E+05	-2,869E+05
G	Momento (N.m)	3,001E+05	-4,007E+05	2,054E+05	-3,036E+05
	Esf. Transverso (N)	1,248E+05	-1,309E+05	1,162E+05	-1,364E+05
H	Momento (N.m)	9,505E+05	-8,918E+05	9,181E+05	-8,104E+05
	Esf. Transverso (N)	3,985E+05	-3,970E+05	2,667E+05	-3,723E+05

Anexo A4

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE (SECÇÕES A; B; C; D; E; F; G; H)



Velocidade de 400 km/h							
Secção A				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	7,413E+05	7,327E+05	7,436E+05	7,538E+05	1,2%	-0,3%	-1,7%
	-5,095E+05	-5,004E+05	-4,812E+05	-5,116E+05	1,8%	5,5%	-0,4%
Deslocamentos (m)	6,540E-04	6,563E-04	6,585E-04	6,556E-04	-0,4%	-0,7%	-0,2%
	-8,147E-04	-8,178E-04	-8,143E-04	-8,109E-04	-0,4%	0,0%	0,5%
Acelerações (m/s ²)	1,543E+00	1,419E+00	1,503E+00	1,477E+00	8,0%	2,6%	4,3%
	-1,180E+00	-1,543E+00	-1,324E+00	-1,560E+00	-30,8%	-12,2%	-32,3%
Esf. Transverso (N)	4,321E+05	4,521E+05	4,650E+05	4,762E+05	-4,6%	-7,6%	-10,2%
	-1,218E+05	-1,200E+05	-1,117E+05	-1,169E+05	1,5%	8,3%	4,1%

Velocidade de 400 km/h							
Secção B				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	5,044E+05	4,992E+05	5,099E+05	4,937E+05	1,0%	-1,1%	2,1%
	-1,355E+05	-1,207E+05	-1,003E+05	-1,455E+05	10,9%	26,0%	-7,4%
Deslocamentos (m)	2,511E-04	2,595E-04	2,452E-04	2,226E-04	-3,3%	2,4%	11,3%
	-7,815E-04	-7,729E-04	-7,461E-04	-7,062E-04	1,1%	4,5%	9,6%
Acelerações (m/s ²)	1,528E+00	1,374E+00	1,602E+00	1,654E+00	10,1%	-4,8%	-8,2%
	-1,207E+00	-1,438E+00	-1,374E+00	-1,473E+00	-19,2%	-13,8%	-22,0%
Esf. Transverso (N)	1,500E+05	1,527E+05	1,532E+05	1,540E+05	-1,8%	-2,1%	-2,6%
	-1,159E+05	-1,188E+05	-1,140E+05	-1,194E+05	-2,5%	1,7%	-3,0%

Velocidade de 400 km/h							
Secção C				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	7,043E+05	6,553E+05	6,365E+05	6,338E+05	7,0%	9,6%	10,0%
	-5,954E+05	-5,817E+05	-5,637E+05	-5,639E+05	2,3%	5,3%	5,3%
Deslocamentos (m)	3,436E-04	3,455E-04	3,492E-04	3,463E-04	-0,6%	-1,6%	-0,8%
	-4,597E-04	-4,626E-04	-4,631E-04	-4,648E-04	-0,6%	-0,8%	-1,1%
Acelerações (m/s ²)	1,443E+00	1,345E+00	1,547E+00	1,725E+00	6,8%	-7,2%	-19,6%
	-1,148E+00	-1,313E+00	-1,326E+00	-1,470E+00	-14,4%	-15,5%	-28,1%
Esf. Transverso (N)	1,820E+05	1,823E+05	1,826E+05	1,718E+05	-0,2%	-0,3%	5,6%
	-4,221E+05	-4,131E+05	-4,223E+05	-4,292E+05	2,1%	0,0%	-1,7%

Velocidade de 400 km/h							
Secção D				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	1,035E+02	1,495E+02	2,663E+02	4,733E+02	-44,4%	-157,2%	-357,1%
	-7,488E+01	-1,884E+02	-2,407E+02	-4,428E+02	-151,5%	-221,5%	-491,4%
Deslocamentos (m)	1,544E-04	1,556E-04	1,554E-04	1,640E-04	-0,8%	-0,7%	-6,2%
	-1,677E-04	-1,658E-04	-1,665E-04	-1,687E-04	1,1%	0,8%	-0,6%
Acelerações (m/s ²)	2,116E+00	2,044E+00	2,081E+00	2,170E+00	3,4%	1,7%	-2,5%
	-2,193E+00	-2,147E+00	-2,308E+00	-2,369E+00	2,1%	-5,2%	-8,0%
Esf. Transverso (N)	8,347E+04	8,369E+04	8,250E+04	8,164E+04	-0,3%	1,2%	2,2%
	-6,427E+04	-6,585E+04	-6,892E+04	-7,485E+04	-2,5%	-7,2%	-16,5%

Velocidade de 400 km/h							
Secção E				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	8,140E+01	1,665E+02	2,469E+02	4,351E+02	-104,6%	-203,4%	-434,5%
	-8,064E+01	-1,617E+02	-1,978E+02	-2,746E+02	-100,5%	-145,2%	-240,5%
Deslocamentos (m)	1,360E-04	1,350E-04	1,348E-04	1,415E-04	0,8%	0,9%	-4,0%
	-1,341E-04	-1,359E-04	-1,342E-04	-1,337E-04	-1,3%	-0,1%	0,3%
Acelerações (m/s ²)	1,187E+00	1,089E+00	1,043E+00	1,009E+00	8,3%	12,1%	15,0%
	-1,027E+00	-1,080E+00	-1,129E+00	-1,082E+00	-5,2%	-9,9%	-5,4%
Esf. Transverso (N)	5,461E+04	5,488E+04	5,640E+04	6,205E+04	-0,5%	-3,3%	-13,6%
	-5,043E+04	-5,067E+04	-4,976E+04	-5,015E+04	-0,5%	1,3%	0,6%

Velocidade de 400 km/h							
Secção F				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	8,701E+05	8,824E+05	8,638E+05	8,425E+05	-1,4%	0,7%	3,2%
	-6,713E+05	-6,708E+05	-7,005E+05	-6,857E+05	0,1%	-4,3%	-2,2%
Deslocamentos (m)	6,434E-04	6,453E-04	6,478E-04	6,433E-04	-0,3%	-0,7%	0,0%
	-8,127E-04	-8,157E-04	-8,134E-04	-8,093E-04	-0,4%	-0,1%	0,4%
Acelerações (m/s ²)	8,533E-01	8,241E-01	7,974E-01	9,150E-01	3,4%	6,6%	-7,2%
	-9,298E-01	-8,963E-01	-9,127E-01	-9,172E-01	3,6%	1,8%	1,4%
Esf. Transverso (N)	4,127E+05	4,243E+05	4,217E+05	4,079E+05	-2,8%	-2,2%	1,2%
	-2,982E+05	-2,975E+05	-3,218E+05	-3,006E+05	0,2%	-7,9%	-0,8%

Velocidade de 400 km/h							
Secção G				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	2,767E+05	2,782E+05	2,830E+05	2,852E+05	-0,6%	-2,3%	-3,1%
	-1,766E+05	-1,694E+05	-1,940E+05	-1,746E+05	4,1%	-9,8%	1,2%
Deslocamentos (m)	2,265E-04	2,264E-04	2,262E-04	2,345E-04	0,0%	0,1%	-3,6%
	-3,811E-04	-3,812E-04	-3,956E-04	-3,794E-04	0,0%	-3,8%	0,5%
Acelerações (m/s ²)	7,477E-01	7,964E-01	8,058E-01	8,467E-01	-6,5%	-7,8%	-13,2%
	-8,358E-01	-8,147E-01	-7,792E-01	-8,576E-01	2,5%	6,8%	-2,6%
Esf. Transverso (N)	9,504E+04	9,253E+04	9,060E+04	9,628E+04	2,6%	4,7%	-1,3%
	-1,367E+05	-1,403E+05	-1,461E+05	-1,451E+05	-2,6%	-6,9%	-6,1%

Velocidade de 400 km/h							
Secção H				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	6,916E+05	6,995E+05	7,140E+05	7,361E+05	-1,1%	-3,2%	-6,4%
	-8,333E+05	-8,370E+05	-8,611E+05	-8,587E+05	-0,4%	-3,3%	-3,0%
Deslocamentos (m)	3,389E-04	3,405E-04	3,445E-04	3,416E-04	-0,5%	-1,6%	-0,8%
	-4,398E-04	-4,407E-04	-4,415E-04	-4,505E-04	-0,2%	-0,4%	-2,4%
Acelerações (m/s ²)	6,240E-01	7,410E-01	7,583E-01	8,242E-01	-18,8%	-21,5%	-32,1%
	-7,081E-01	-6,971E-01	-6,632E-01	-7,609E-01	1,5%	6,3%	-7,5%
Esf. Transverso (N)	3,235E+05	3,217E+05	3,417E+05	3,410E+05	0,6%	-5,6%	-5,4%
	-2,032E+05	-1,935E+05	-1,817E+05	-2,166E+05	4,8%	10,6%	-6,6%

Velocidade de 420 km/h							
Secção A				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	7,438E+05	7,602E+05	7,950E+05	7,494E+05	-2,2%	-6,9%	-0,8%
	-5,397E+05	-5,480E+05	-5,622E+05	-5,300E+05	-1,5%	-4,2%	1,8%
Deslocamentos (m)	7,279E-04	7,263E-04	7,282E-04	7,189E-04	0,2%	0,0%	1,2%
	-8,161E-04	-8,128E-04	-8,121E-04	-8,305E-04	0,4%	0,5%	-1,8%
Acelerações (m/s ²)	1,928E+00	2,020E+00	2,122E+00	2,200E+00	-4,8%	-10,1%	-14,1%
	-1,818E+00	-1,933E+00	-2,550E+00	-2,133E+00	-6,3%	-40,3%	-17,3%
Esf. Transverso (N)	4,813E+05	4,671E+05	4,550E+05	4,334E+05	2,9%	5,5%	10,0%
	-1,150E+05	-1,255E+05	-1,192E+05	-1,140E+05	-9,1%	-3,7%	0,9%

Velocidade de 420 km/h							
Secção B				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	4,845E+05	5,234E+05	5,782E+05	5,853E+05	-8,0%	-19,3%	-20,8%
	-1,485E+05	-1,650E+05	-1,565E+05	-1,445E+05	-11,1%	-5,4%	2,7%
Deslocamentos (m)	2,527E-04	2,473E-04	2,423E-04	2,439E-04	2,1%	4,1%	3,5%
	-7,466E-04	-7,332E-04	-7,056E-04	-7,463E-04	1,8%	5,5%	0,0%
Acelerações (m/s ²)	1,918E+00	2,048E+00	2,147E+00	2,223E+00	-6,8%	-11,9%	-15,9%
	-1,728E+00	-1,842E+00	-2,558E+00	-2,321E+00	-6,7%	-48,1%	-34,3%
Esf. Transverso (N)	1,663E+05	1,684E+05	1,745E+05	2,231E+05	-1,3%	-5,0%	-34,2%
	-1,486E+05	-1,543E+05	-1,616E+05	-1,520E+05	-3,9%	-8,8%	-2,3%

Velocidade de 420 km/h							
Secção C				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	6,349E+05	6,367E+05	6,421E+05	6,663E+05	-0,3%	-1,1%	-4,9%
	-7,034E+05	-7,157E+05	-7,325E+05	-7,188E+05	-1,8%	-4,1%	-2,2%
Deslocamentos (m)	4,110E-04	4,069E-04	4,087E-04	4,097E-04	1,0%	0,6%	0,3%
	-5,406E-04	-5,445E-04	-5,377E-04	-5,287E-04	-0,7%	0,5%	2,2%
Acelerações (m/s ²)	1,833E+00	1,935E+00	2,046E+00	1,977E+00	-5,6%	-11,6%	-7,8%
	-1,551E+00	-1,638E+00	-2,350E+00	-2,283E+00	-5,6%	-51,6%	-47,2%
Esf. Transverso (N)	1,895E+05	1,919E+05	1,862E+05	1,977E+05	-1,3%	1,7%	-4,3%
	-4,296E+05	-4,451E+05	-4,432E+05	-4,303E+05	-3,6%	-3,2%	-0,2%

Velocidade de 420 km/h							
Secção D				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	1,571E+02	2,332E+02	4,634E+02	8,829E+02	-48,4%	-195,0%	-462,0%
	-9,535E+01	-2,132E+02	-3,957E+02	-6,769E+02	-123,6%	-315,0%	-609,9%
Deslocamentos (m)	2,011E-04	2,021E-04	1,992E-04	1,965E-04	-0,5%	1,0%	2,3%
	-1,887E-04	-1,878E-04	-1,869E-04	-1,939E-04	0,5%	0,9%	-2,8%
Acelerações (m/s ²)	2,373E+00	2,479E+00	2,647E+00	2,820E+00	-4,5%	-11,6%	-18,8%
	-2,937E+00	-2,889E+00	-3,006E+00	-3,397E+00	1,6%	-2,4%	-15,7%
Esf. Transverso (N)	9,399E+04	9,400E+04	9,640E+04	1,004E+05	0,0%	-2,6%	-6,8%
	-8,024E+04	-8,066E+04	-8,134E+04	-8,800E+04	-0,5%	-1,4%	-9,7%

Velocidade de 420 km/h							
Secção E				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	1,317E+02	1,655E+02	3,260E+02	3,831E+02	-25,6%	-147,5%	-190,9%
	-9,641E+01	-1,732E+02	-3,415E+02	-3,735E+02	-79,6%	-254,3%	-287,4%
Deslocamentos (m)	1,657E-04	1,620E-04	1,582E-04	1,549E-04	2,2%	4,5%	6,5%
	-1,587E-04	-1,599E-04	-1,608E-04	-1,600E-04	-0,7%	-1,3%	-0,8%
Acelerações (m/s ²)	1,192E+00	1,202E+00	1,334E+00	1,281E+00	-0,9%	-11,9%	-7,5%
	-1,211E+00	-1,137E+00	-1,240E+00	-1,202E+00	6,2%	-2,3%	0,8%
Esf. Transverso (N)	8,099E+04	7,996E+04	7,865E+04	8,355E+04	1,3%	2,9%	-3,2%
	-5,715E+04	-5,654E+04	-6,201E+04	-5,995E+04	1,1%	-8,5%	-4,9%

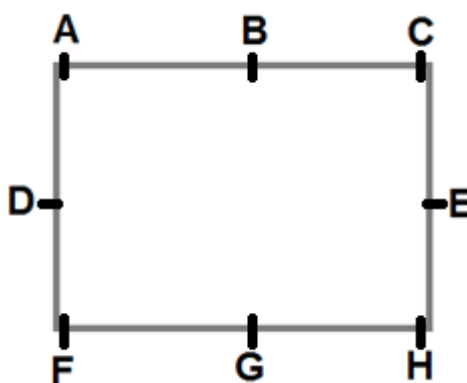
Velocidade de 420 km/h							
Secção F				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	9,166E+05	9,132E+05	9,301E+05	9,158E+05	0,4%	-1,5%	0,1%
	-7,684E+05	-7,905E+05	-8,103E+05	-7,104E+05	-2,9%	-5,5%	7,6%
Deslocamentos (m)	7,185E-04	7,168E-04	7,158E-04	7,110E-04	0,2%	0,4%	1,0%
	-8,124E-04	-8,083E-04	-8,008E-04	-8,211E-04	0,5%	1,4%	-1,1%
Acelerações (m/s ²)	9,848E-01	1,055E+00	1,062E+00	1,211E+00	-7,1%	-7,8%	-23,0%
	-9,917E-01	-9,133E-01	-1,141E+00	-1,031E+00	7,9%	-15,1%	-3,9%
Esf. Transverso (N)	4,300E+05	4,282E+05	4,339E+05	4,530E+05	0,4%	-0,9%	-5,4%
	-2,869E+05	-3,034E+05	-3,134E+05	-2,652E+05	-5,7%	-9,2%	7,6%

Velocidade de 420 km/h							
Secção G				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	3,036E+05	3,285E+05	3,435E+05	3,536E+05	-8,2%	-13,2%	-16,5%
	-2,054E+05	-2,114E+05	-2,087E+05	-2,273E+05	-3,0%	-1,6%	-10,7%
Deslocamentos (m)	2,742E-04	2,698E-04	2,788E-04	2,965E-04	1,6%	-1,7%	-8,1%
	-4,804E-04	-4,850E-04	-4,777E-04	-4,743E-04	-1,0%	0,6%	1,3%
Acelerações (m/s ²)	9,795E-01	9,567E-01	1,148E+00	1,095E+00	2,3%	-17,2%	-11,8%
	-9,768E-01	-8,389E-01	-1,175E+00	-1,120E+00	14,1%	-20,3%	-14,6%
Esf. Transverso (N)	1,162E+05	1,179E+05	1,179E+05	1,281E+05	-1,5%	-1,5%	-10,3%
	-1,364E+05	-1,466E+05	-1,455E+05	-1,517E+05	-7,5%	-6,7%	-11,3%

Velocidade de 420 km/h							
Secção H				Erro (%)			
Incremento de tempo	0,002 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s	0,003 s	0,004 s	0,005 s
Momentos (N.m)	8,104E+05	8,196E+05	8,304E+05	8,357E+05	-1,1%	-2,5%	-3,1%
	-9,181E+05	-9,079E+05	-8,933E+05	-8,798E+05	1,1%	2,7%	4,2%
Deslocamentos (m)	4,054E-04	4,008E-04	4,019E-04	4,015E-04	1,1%	0,9%	1,0%
	-5,252E-04	-5,289E-04	-5,223E-04	-5,165E-04	-0,7%	0,6%	1,7%
Acelerações (m/s ²)	9,026E-01	8,967E-01	1,018E+00	9,050E-01	0,7%	-12,8%	-0,3%
	-9,206E-01	-8,477E-01	-1,137E+00	-9,969E-01	7,9%	-23,5%	-8,3%
Esf. Transverso (N)	3,723E+05	3,829E+05	3,913E+05	4,138E+05	-2,9%	-5,1%	-11,2%
	-2,667E+05	-2,758E+05	-2,747E+05	-2,719E+05	-3,4%	-3,0%	-2,0%

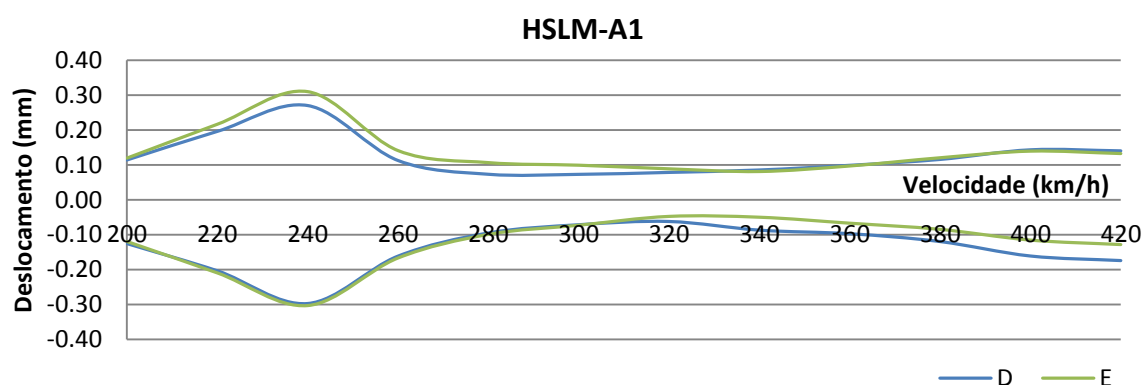
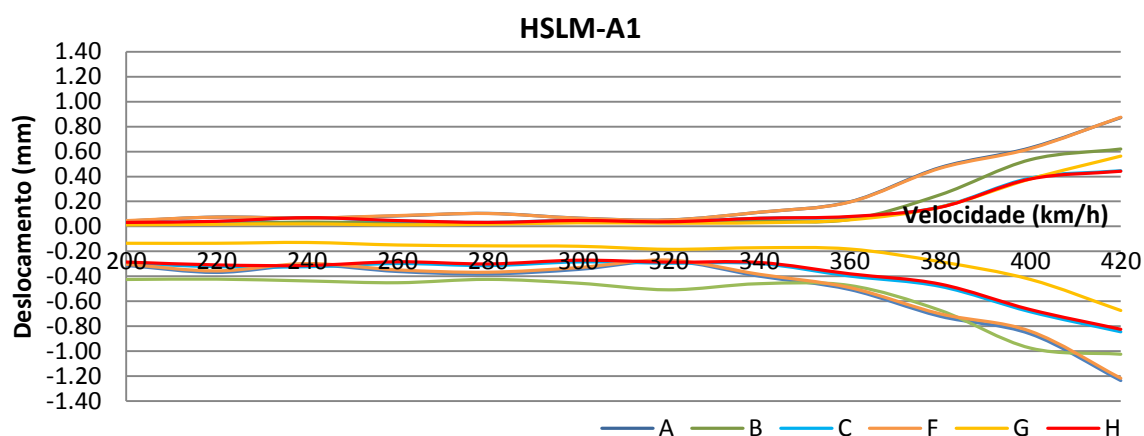
Anexo A5

DESLOCAMENTOS NAS SECÇÕES (A; B; C; D; E; F; G; H)



Comboio HSLM-A1								
Deslocamentos positivos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,043	0,024	0,031	0,114	0,119	0,046	0,012	0,032
220	0,075	0,025	0,038	0,196	0,216	0,074	0,017	0,041
240	0,067	0,034	0,071	0,270	0,310	0,067	0,020	0,070
260	0,084	0,028	0,043	0,113	0,141	0,087	0,012	0,047
280	0,104	0,028	0,032	0,073	0,107	0,103	0,018	0,032
300	0,066	0,033	0,048	0,073	0,099	0,066	0,029	0,047
320	0,052	0,043	0,036	0,079	0,089	0,051	0,026	0,037
340	0,113	0,042	0,065	0,086	0,081	0,114	0,029	0,065
360	0,197	0,055	0,074	0,099	0,097	0,195	0,053	0,079
380	0,472	0,253	0,156	0,116	0,121	0,466	0,154	0,153
400	0,630	0,535	0,388	0,143	0,139	0,624	0,381	0,380
420	0,872	0,620	0,446	0,140	0,133	0,875	0,563	0,442

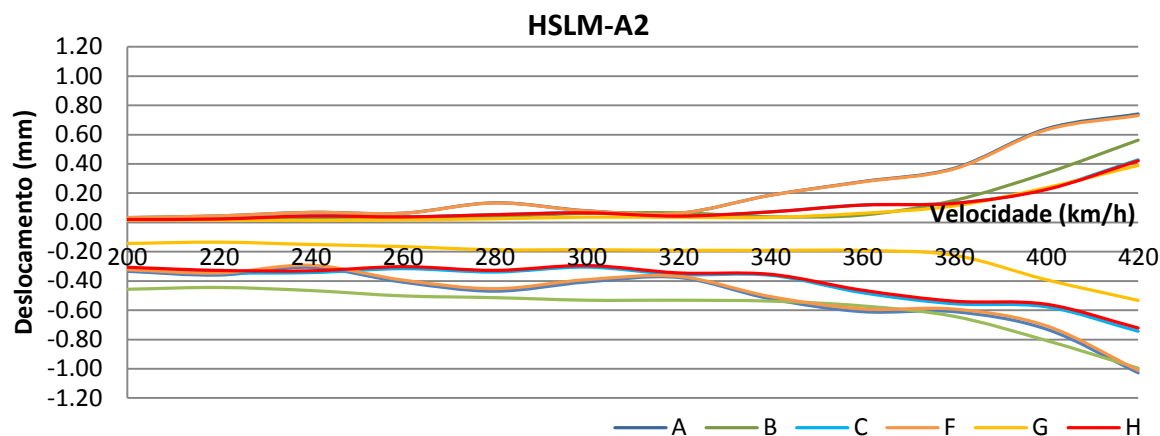
Comboio HSLM-A1								
Deslocamentos negativos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,313	-0,425	-0,296	-0,125	-0,119	-0,304	-0,135	-0,286
220	-0,369	-0,423	-0,322	-0,203	-0,209	-0,357	-0,135	-0,309
240	-0,310	-0,437	-0,323	-0,297	-0,303	-0,298	-0,129	-0,314
260	-0,362	-0,452	-0,297	-0,161	-0,167	-0,349	-0,149	-0,284
280	-0,381	-0,425	-0,314	-0,095	-0,099	-0,367	-0,156	-0,301
300	-0,345	-0,455	-0,285	-0,071	-0,073	-0,330	-0,159	-0,271
320	-0,278	-0,509	-0,295	-0,062	-0,047	-0,270	-0,184	-0,287
340	-0,399	-0,459	-0,298	-0,087	-0,050	-0,384	-0,171	-0,289
360	-0,506	-0,474	-0,398	-0,097	-0,067	-0,490	-0,181	-0,380
380	-0,720	-0,672	-0,481	-0,119	-0,084	-0,700	-0,283	-0,462
400	-0,862	-0,975	-0,685	-0,161	-0,115	-0,841	-0,425	-0,667
420	-1,236	-1,025	-0,845	-0,174	-0,128	-1,217	-0,674	-0,825



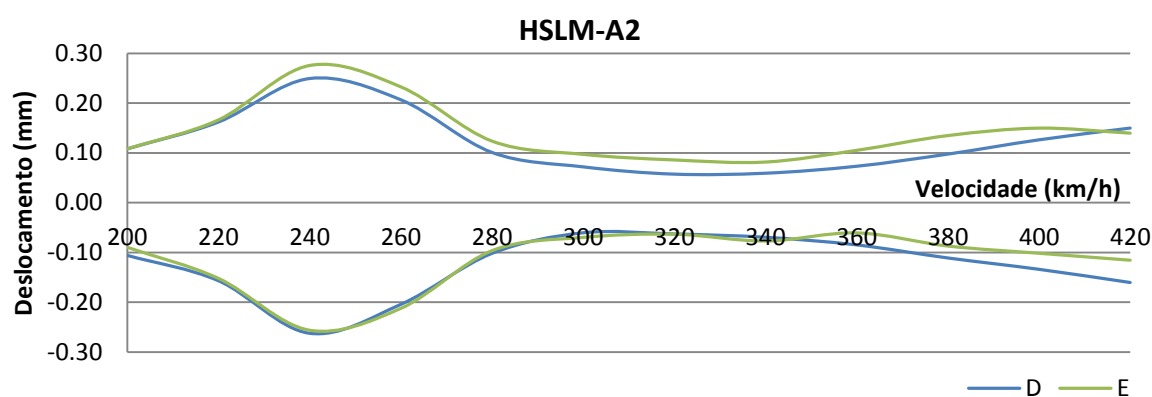
Anexo A5.1 - Deslocamentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar a) Deslocamentos verticais b) Deslocamentos horizontais

Comboio HSLM-A2								
Deslocamentos positivos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,033	0,022	0,019	0,108	0,108	0,033	0,015	0,020
220	0,045	0,030	0,023	0,162	0,166	0,045	0,016	0,023
240	0,069	0,034	0,045	0,250	0,276	0,069	0,013	0,044
260	0,063	0,037	0,038	0,207	0,233	0,063	0,018	0,038
280	0,134	0,040	0,053	0,101	0,124	0,133	0,025	0,053
300	0,080	0,062	0,067	0,072	0,097	0,079	0,036	0,065
320	0,063	0,066	0,042	0,057	0,086	0,063	0,034	0,043
340	0,186	0,039	0,072	0,059	0,082	0,186	0,034	0,072
360	0,279	0,051	0,120	0,073	0,105	0,277	0,063	0,119
380	0,370	0,151	0,131	0,098	0,135	0,366	0,113	0,131
400	0,640	0,337	0,229	0,126	0,150	0,633	0,237	0,225
420	0,741	0,562	0,428	0,150	0,140	0,731	0,390	0,421

Comboio HSLM-A2								
Deslocamentos negativos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,334	-0,457	-0,319	-0,106	-0,090	-0,323	-0,144	-0,307
220	-0,359	-0,444	-0,343	-0,157	-0,152	-0,346	-0,135	-0,328
240	-0,307	-0,466	-0,343	-0,262	-0,256	-0,293	-0,151	-0,331
260	-0,408	-0,502	-0,316	-0,204	-0,212	-0,394	-0,165	-0,302
280	-0,470	-0,514	-0,339	-0,102	-0,096	-0,453	-0,187	-0,328
300	-0,407	-0,532	-0,305	-0,060	-0,070	-0,391	-0,186	-0,295
320	-0,376	-0,532	-0,356	-0,063	-0,063	-0,369	-0,190	-0,345
340	-0,522	-0,538	-0,361	-0,069	-0,077	-0,507	-0,191	-0,355
360	-0,610	-0,571	-0,480	-0,085	-0,061	-0,591	-0,191	-0,463
380	-0,610	-0,642	-0,556	-0,111	-0,087	-0,592	-0,224	-0,538
400	-0,729	-0,807	-0,576	-0,134	-0,102	-0,706	-0,391	-0,559
420	-1,028	-0,996	-0,744	-0,160	-0,115	-1,010	-0,533	-0,721



a)

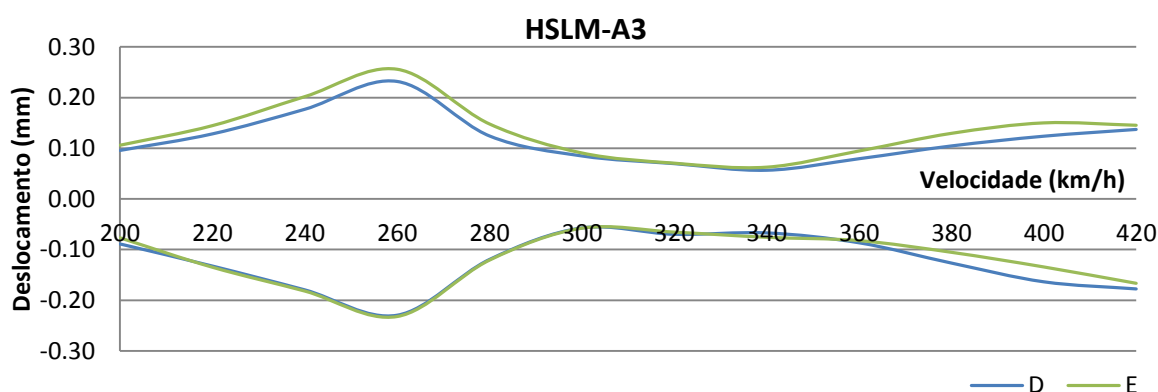
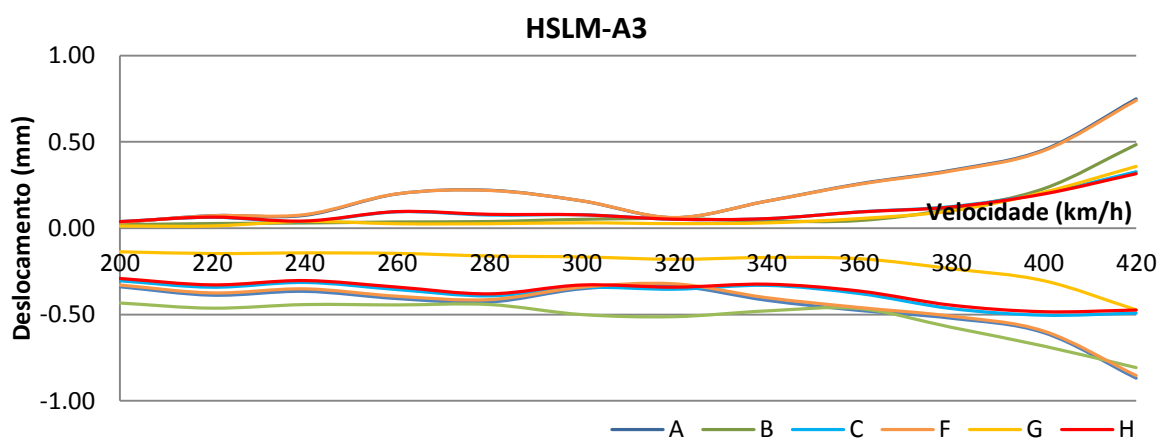


b)

Anexo A5.2 - Deslocamentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar a)
Deslocamentos verticais b) Deslocamentos horizontais

Comboio HSLM-A3								
Deslocamentos positivos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,033	0,020	0,038	0,096	0,106	0,034	0,013	0,038
220	0,073	0,027	0,063	0,128	0,145	0,072	0,013	0,064
240	0,074	0,030	0,038	0,177	0,202	0,079	0,040	0,042
260	0,198	0,036	0,095	0,232	0,256	0,199	0,026	0,096
280	0,220	0,039	0,076	0,124	0,148	0,219	0,026	0,080
300	0,158	0,052	0,078	0,085	0,091	0,159	0,031	0,078
320	0,061	0,056	0,052	0,070	0,070	0,062	0,027	0,052
340	0,157	0,042	0,055	0,057	0,063	0,157	0,031	0,055
360	0,257	0,044	0,095	0,079	0,095	0,254	0,056	0,094
380	0,336	0,111	0,125	0,104	0,129	0,332	0,100	0,123
400	0,454	0,229	0,202	0,124	0,150	0,449	0,208	0,198
420	0,749	0,484	0,327	0,137	0,145	0,740	0,358	0,316

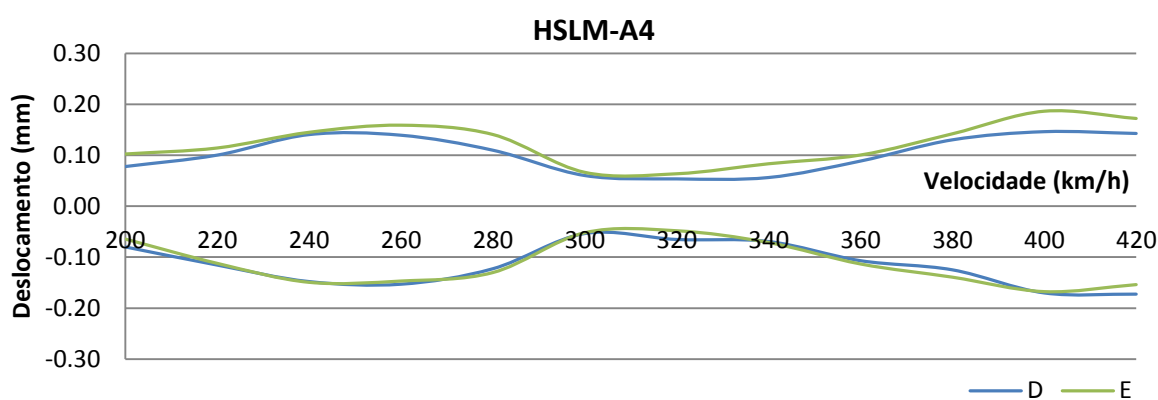
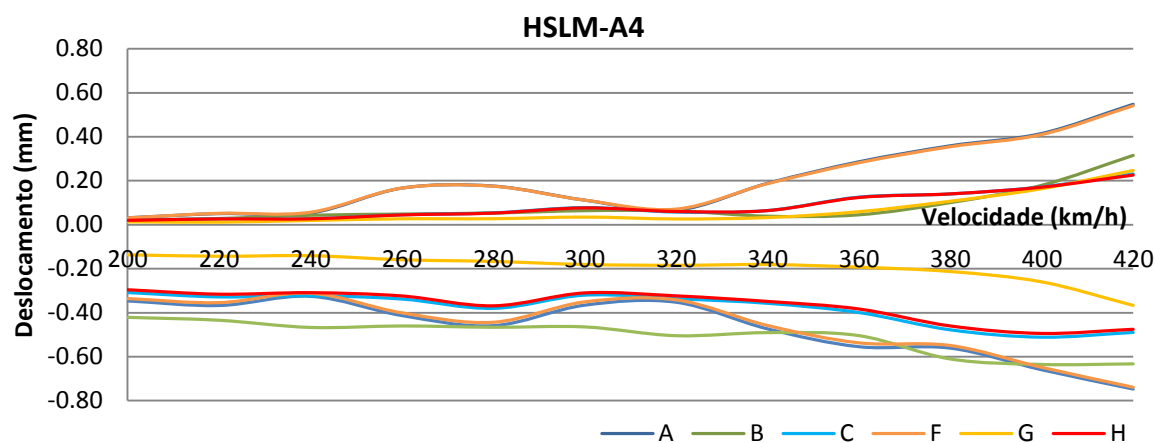
Comboio HSLM-A3								
Deslocamentos negativos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,339	-0,433	-0,305	-0,089	-0,077	-0,329	-0,136	-0,291
220	-0,388	-0,463	-0,342	-0,133	-0,135	-0,375	-0,147	-0,328
240	-0,366	-0,442	-0,314	-0,180	-0,182	-0,351	-0,143	-0,303
260	-0,408	-0,444	-0,355	-0,230	-0,232	-0,394	-0,146	-0,341
280	-0,428	-0,442	-0,392	-0,120	-0,121	-0,414	-0,161	-0,380
300	-0,351	-0,500	-0,343	-0,057	-0,058	-0,342	-0,166	-0,329
320	-0,335	-0,512	-0,353	-0,070	-0,066	-0,322	-0,180	-0,342
340	-0,417	-0,479	-0,331	-0,067	-0,076	-0,403	-0,170	-0,324
360	-0,476	-0,465	-0,378	-0,087	-0,082	-0,459	-0,177	-0,364
380	-0,521	-0,574	-0,465	-0,127	-0,105	-0,509	-0,235	-0,446
400	-0,605	-0,683	-0,504	-0,164	-0,134	-0,596	-0,304	-0,484
420	-0,869	-0,807	-0,492	-0,178	-0,167	-0,854	-0,473	-0,474



Anexo A5.3 - Deslocamentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar a) Deslocamentos verticais b) Deslocamentos horizontais

Comboio HSLM-A4								
Deslocamentos positivos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,032	0,021	0,019	0,078	0,103	0,031	0,013	0,020
220	0,051	0,028	0,027	0,100	0,114	0,052	0,012	0,026
240	0,053	0,043	0,027	0,141	0,145	0,057	0,020	0,027
260	0,167	0,048	0,045	0,139	0,159	0,167	0,027	0,045
280	0,176	0,053	0,054	0,110	0,141	0,175	0,027	0,053
300	0,112	0,064	0,078	0,060	0,067	0,112	0,035	0,077
320	0,066	0,063	0,058	0,054	0,064	0,071	0,026	0,060
340	0,188	0,039	0,065	0,056	0,083	0,187	0,033	0,064
360	0,286	0,045	0,126	0,089	0,101	0,282	0,059	0,124
380	0,359	0,101	0,140	0,130	0,142	0,355	0,107	0,140
400	0,415	0,179	0,172	0,146	0,187	0,411	0,164	0,171
420	0,548	0,315	0,231	0,143	0,172	0,541	0,247	0,226

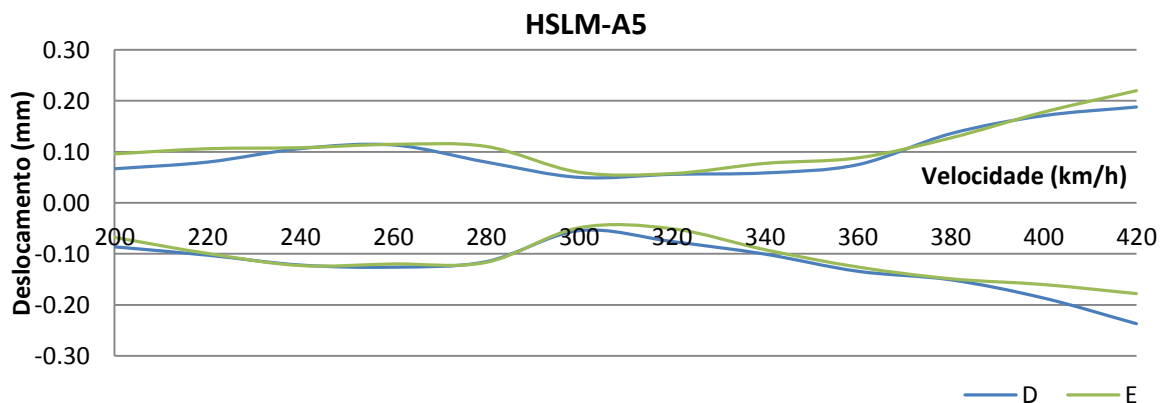
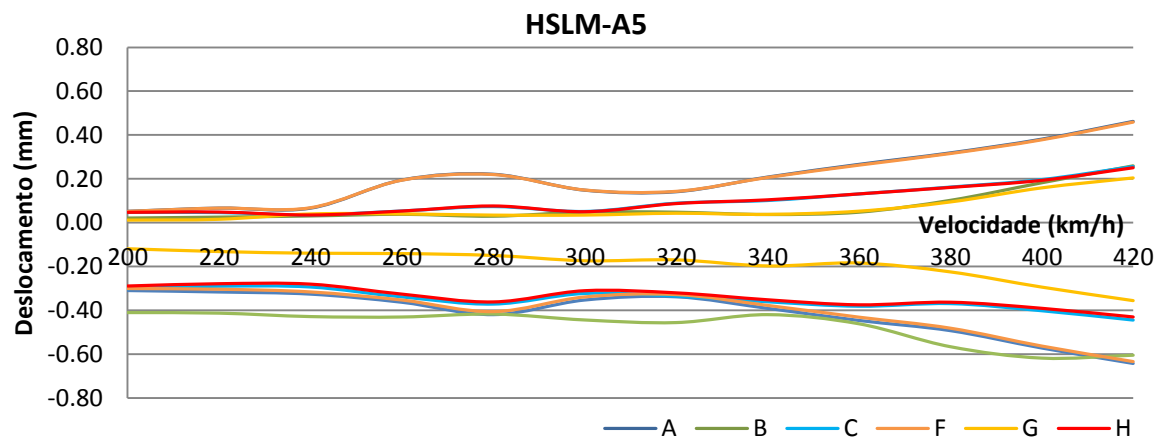
Comboio HSLM-A4								
Deslocamentos negativos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,346	-0,421	-0,308	-0,080	-0,064	-0,336	-0,137	-0,296
220	-0,367	-0,434	-0,328	-0,116	-0,112	-0,354	-0,143	-0,316
240	-0,325	-0,467	-0,323	-0,148	-0,149	-0,312	-0,141	-0,309
260	-0,413	-0,460	-0,338	-0,153	-0,147	-0,401	-0,159	-0,324
280	-0,459	-0,466	-0,380	-0,123	-0,130	-0,443	-0,167	-0,369
300	-0,366	-0,465	-0,320	-0,054	-0,052	-0,351	-0,181	-0,310
320	-0,352	-0,505	-0,336	-0,065	-0,048	-0,341	-0,184	-0,323
340	-0,474	-0,491	-0,357	-0,069	-0,071	-0,458	-0,181	-0,349
360	-0,555	-0,504	-0,399	-0,107	-0,113	-0,537	-0,193	-0,383
380	-0,561	-0,610	-0,478	-0,125	-0,139	-0,549	-0,213	-0,460
400	-0,660	-0,635	-0,511	-0,170	-0,168	-0,649	-0,260	-0,494
420	-0,747	-0,633	-0,490	-0,173	-0,154	-0,739	-0,367	-0,475



Anexo A5.4 - Deslocamentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar a) Deslocamentos verticais b) Deslocamentos horizontais

Comboio HSLM-A5								
Deslocamentos positivos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,052	0,021	0,047	0,067	0,096	0,052	0,012	0,047
220	0,067	0,025	0,046	0,080	0,106	0,067	0,016	0,049
240	0,066	0,031	0,035	0,106	0,108	0,068	0,040	0,035
260	0,195	0,038	0,053	0,113	0,115	0,194	0,040	0,053
280	0,221	0,030	0,074	0,080	0,111	0,220	0,035	0,076
300	0,148	0,049	0,051	0,050	0,060	0,149	0,035	0,050
320	0,141	0,048	0,089	0,056	0,057	0,143	0,043	0,087
340	0,208	0,037	0,101	0,059	0,077	0,206	0,038	0,104
360	0,266	0,048	0,131	0,075	0,088	0,263	0,053	0,131
380	0,318	0,102	0,163	0,136	0,127	0,316	0,095	0,161
400	0,381	0,182	0,197	0,171	0,178	0,378	0,159	0,193
420	0,462	0,260	0,256	0,188	0,220	0,459	0,204	0,251

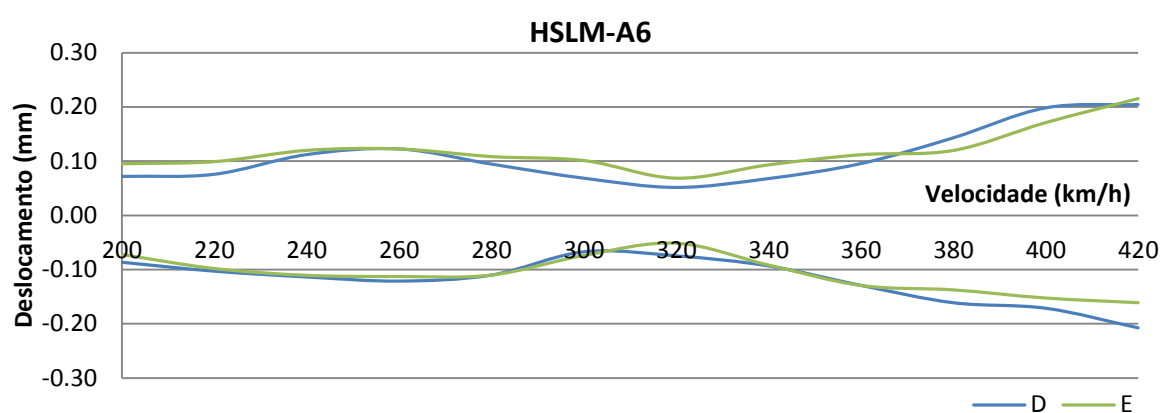
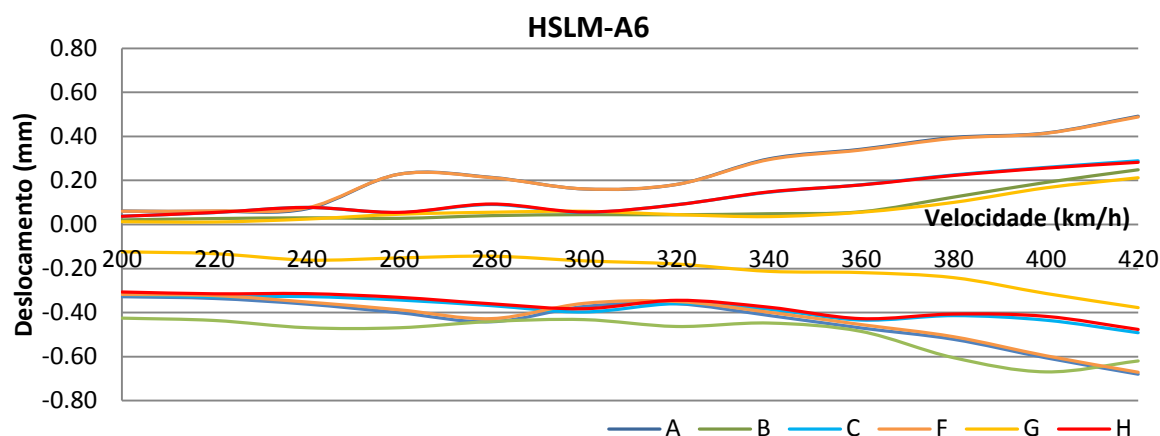
Comboio HSLM-A5								
Deslocamentos negativos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,310	-0,410	-0,301	-0,086	-0,068	-0,300	-0,119	-0,289
220	-0,316	-0,413	-0,290	-0,103	-0,099	-0,304	-0,132	-0,278
240	-0,326	-0,428	-0,293	-0,122	-0,123	-0,316	-0,139	-0,280
260	-0,363	-0,430	-0,338	-0,126	-0,120	-0,353	-0,141	-0,326
280	-0,419	-0,417	-0,371	-0,115	-0,117	-0,406	-0,150	-0,362
300	-0,353	-0,444	-0,323	-0,055	-0,049	-0,339	-0,174	-0,310
320	-0,338	-0,456	-0,335	-0,076	-0,051	-0,328	-0,170	-0,320
340	-0,391	-0,419	-0,361	-0,101	-0,092	-0,377	-0,197	-0,352
360	-0,446	-0,461	-0,381	-0,134	-0,126	-0,431	-0,184	-0,375
380	-0,492	-0,566	-0,369	-0,151	-0,149	-0,481	-0,224	-0,363
400	-0,572	-0,618	-0,402	-0,187	-0,160	-0,563	-0,294	-0,391
420	-0,642	-0,605	-0,444	-0,237	-0,178	-0,634	-0,356	-0,430



Anexo A5.5 - Deslocamentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar a) Deslocamentos verticais b) Deslocamentos horizontais

Comboio HSLM-A6								
Deslocamentos positivos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,061	0,021	0,038	0,072	0,095	0,060	0,013	0,037
220	0,060	0,027	0,054	0,076	0,099	0,062	0,011	0,054
240	0,071	0,030	0,077	0,112	0,120	0,075	0,025	0,077
260	0,229	0,028	0,054	0,123	0,122	0,228	0,046	0,055
280	0,214	0,040	0,091	0,095	0,108	0,213	0,056	0,093
300	0,161	0,045	0,055	0,069	0,101	0,162	0,060	0,057
320	0,182	0,044	0,090	0,052	0,069	0,182	0,045	0,089
340	0,298	0,049	0,146	0,068	0,093	0,294	0,036	0,148
360	0,342	0,058	0,180	0,096	0,112	0,338	0,056	0,180
380	0,395	0,124	0,225	0,143	0,120	0,391	0,100	0,223
400	0,415	0,191	0,259	0,198	0,171	0,414	0,166	0,256
420	0,492	0,248	0,289	0,204	0,215	0,488	0,212	0,282

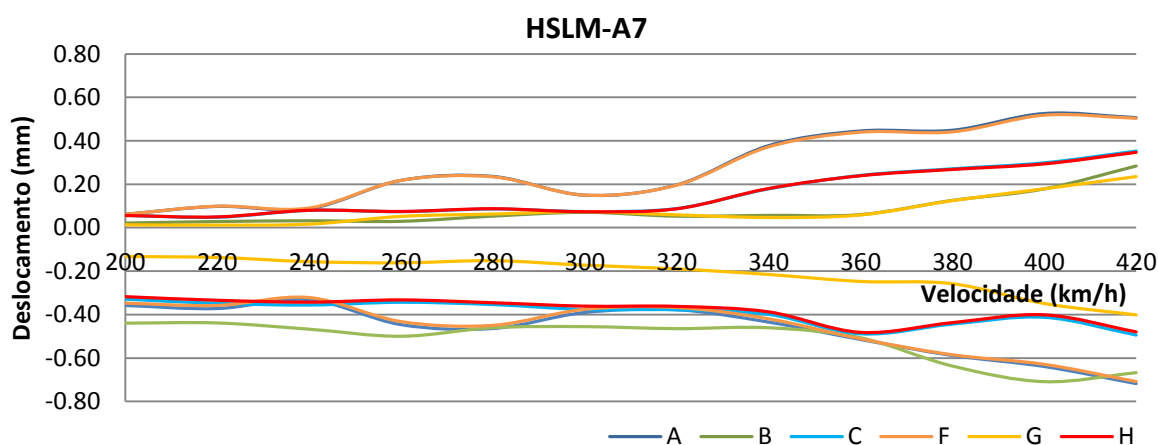
Comboio HSLM-A6								
Deslocamentos negativos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,328	-0,425	-0,318	-0,086	-0,072	-0,318	-0,124	-0,306
220	-0,336	-0,436	-0,328	-0,103	-0,098	-0,323	-0,132	-0,315
240	-0,362	-0,469	-0,327	-0,114	-0,111	-0,352	-0,162	-0,314
260	-0,401	-0,469	-0,343	-0,121	-0,113	-0,387	-0,152	-0,331
280	-0,442	-0,440	-0,369	-0,110	-0,110	-0,427	-0,144	-0,360
300	-0,373	-0,432	-0,397	-0,067	-0,074	-0,358	-0,165	-0,383
320	-0,360	-0,463	-0,359	-0,075	-0,051	-0,350	-0,180	-0,344
340	-0,413	-0,448	-0,385	-0,093	-0,092	-0,398	-0,213	-0,376
360	-0,470	-0,485	-0,434	-0,129	-0,129	-0,454	-0,218	-0,427
380	-0,521	-0,605	-0,414	-0,161	-0,137	-0,509	-0,241	-0,407
400	-0,605	-0,669	-0,435	-0,171	-0,152	-0,596	-0,313	-0,417
420	-0,680	-0,620	-0,492	-0,207	-0,161	-0,671	-0,377	-0,477



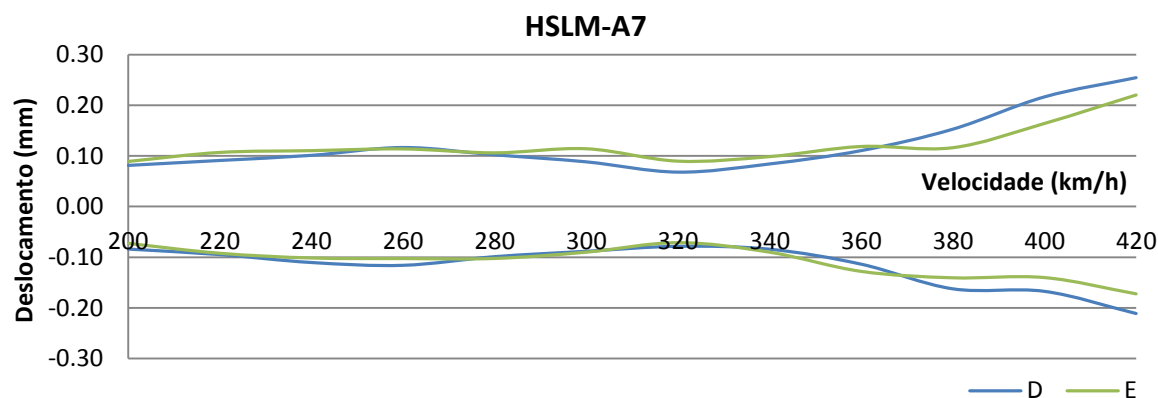
Anexo A5.6 – Deslocamentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar a) Deslocamentos verticais b) Deslocamentos horizontais

Comboio HSLM-A7								
Deslocamentos positivos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,062	0,021	0,057	0,081	0,089	0,062	0,013	0,056
220	0,098	0,028	0,048	0,091	0,107	0,099	0,012	0,050
240	0,087	0,032	0,080	0,101	0,110	0,091	0,016	0,080
260	0,218	0,029	0,074	0,117	0,114	0,218	0,052	0,075
280	0,236	0,053	0,086	0,102	0,106	0,234	0,063	0,087
300	0,150	0,071	0,074	0,088	0,114	0,150	0,074	0,074
320	0,197	0,053	0,088	0,068	0,090	0,196	0,059	0,087
340	0,378	0,057	0,179	0,084	0,099	0,372	0,047	0,181
360	0,445	0,060	0,241	0,110	0,119	0,440	0,059	0,239
380	0,449	0,126	0,271	0,153	0,116	0,441	0,125	0,268
400	0,526	0,179	0,299	0,216	0,164	0,518	0,179	0,294
420	0,507	0,284	0,353	0,254	0,220	0,504	0,235	0,347

Comboio HSLM-A7								
Deslocamentos negativos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,358	-0,439	-0,329	-0,084	-0,073	-0,347	-0,132	-0,317
220	-0,372	-0,439	-0,348	-0,095	-0,092	-0,358	-0,137	-0,334
240	-0,331	-0,467	-0,356	-0,110	-0,102	-0,322	-0,156	-0,343
260	-0,446	-0,500	-0,343	-0,116	-0,103	-0,432	-0,162	-0,332
280	-0,464	-0,460	-0,354	-0,099	-0,102	-0,449	-0,152	-0,346
300	-0,390	-0,455	-0,376	-0,088	-0,090	-0,376	-0,173	-0,361
320	-0,378	-0,465	-0,378	-0,079	-0,071	-0,368	-0,189	-0,362
340	-0,435	-0,460	-0,399	-0,084	-0,090	-0,419	-0,215	-0,387
360	-0,515	-0,507	-0,489	-0,114	-0,128	-0,511	-0,247	-0,482
380	-0,588	-0,637	-0,444	-0,162	-0,141	-0,585	-0,258	-0,437
400	-0,639	-0,709	-0,412	-0,167	-0,140	-0,629	-0,349	-0,401
420	-0,718	-0,667	-0,494	-0,211	-0,172	-0,708	-0,401	-0,479



a)

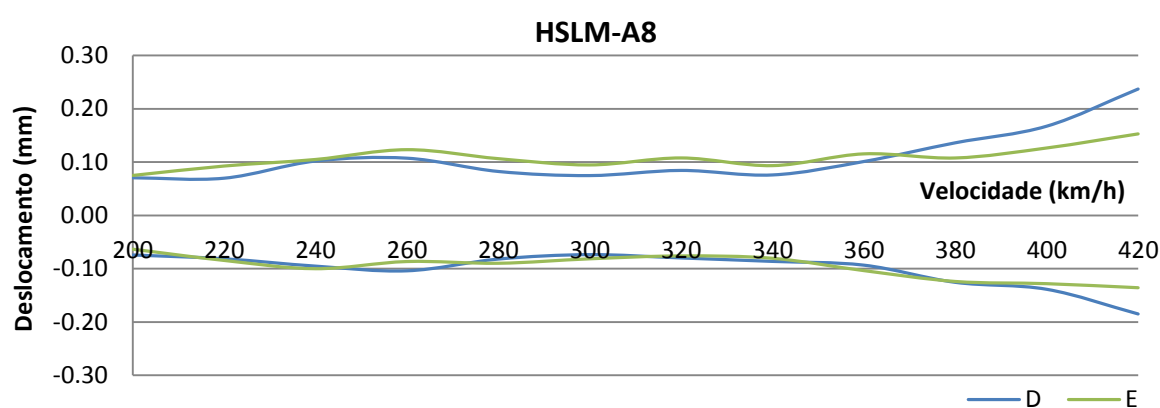
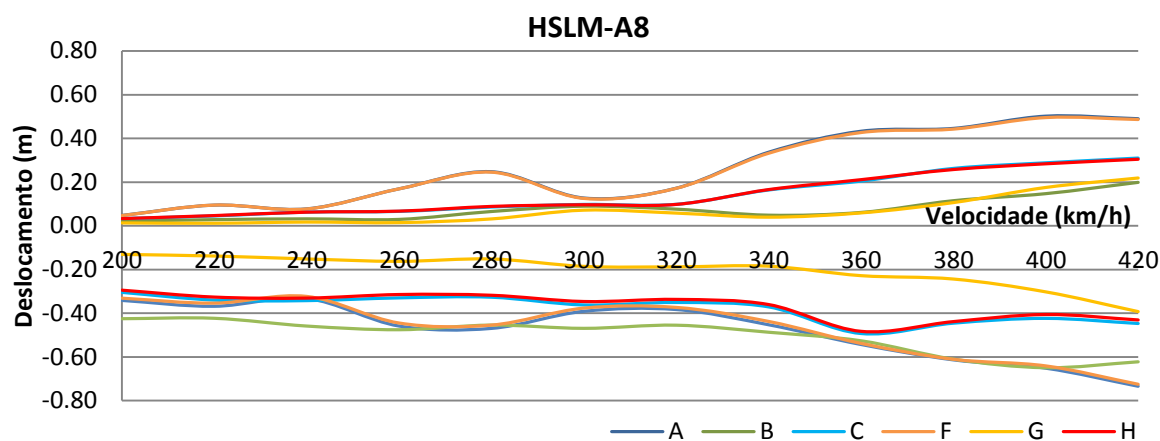


b)

Anexo A5.7 - Deslocamentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar a) Deslocamentos verticais b) Deslocamentos horizontais

Comboio HSLM-A8								
Deslocamentos positivos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,048	0,021	0,033	0,070	0,075	0,047	0,013	0,033
220	0,095	0,028	0,045	0,070	0,093	0,095	0,012	0,047
240	0,078	0,032	0,063	0,102	0,105	0,077	0,017	0,063
260	0,169	0,029	0,066	0,107	0,123	0,169	0,015	0,067
280	0,248	0,066	0,086	0,082	0,106	0,245	0,032	0,089
300	0,127	0,090	0,098	0,075	0,095	0,125	0,072	0,096
320	0,172	0,076	0,098	0,084	0,108	0,172	0,058	0,098
340	0,337	0,049	0,164	0,076	0,093	0,332	0,040	0,166
360	0,433	0,061	0,205	0,101	0,115	0,427	0,059	0,211
380	0,446	0,115	0,263	0,136	0,108	0,443	0,106	0,258
400	0,502	0,147	0,288	0,167	0,126	0,495	0,176	0,284
420	0,490	0,199	0,310	0,237	0,153	0,486	0,219	0,305

Comboio HSLM-A8								
Deslocamentos negativos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,341	-0,425	-0,305	-0,074	-0,063	-0,331	-0,131	-0,294
220	-0,368	-0,423	-0,340	-0,081	-0,085	-0,354	-0,138	-0,326
240	-0,332	-0,459	-0,342	-0,095	-0,100	-0,323	-0,152	-0,331
260	-0,459	-0,475	-0,330	-0,104	-0,087	-0,445	-0,163	-0,314
280	-0,469	-0,454	-0,327	-0,082	-0,090	-0,454	-0,152	-0,318
300	-0,391	-0,469	-0,362	-0,074	-0,081	-0,377	-0,186	-0,346
320	-0,383	-0,455	-0,351	-0,080	-0,076	-0,373	-0,188	-0,337
340	-0,453	-0,487	-0,371	-0,086	-0,080	-0,437	-0,185	-0,360
360	-0,543	-0,526	-0,493	-0,093	-0,104	-0,538	-0,228	-0,483
380	-0,613	-0,610	-0,445	-0,126	-0,124	-0,611	-0,243	-0,438
400	-0,651	-0,649	-0,423	-0,139	-0,128	-0,641	-0,302	-0,406
420	-0,734	-0,622	-0,447	-0,185	-0,136	-0,725	-0,392	-0,431



Anexo A-5.8 - Deslocamentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar a) Deslocamentos verticais b) Deslocamentos horizontais

Comboio HSLM-A9								
Deslocamentos positivos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,066	0,024	0,041	0,069	0,084	0,066	0,016	0,042
220	0,130	0,031	0,049	0,083	0,103	0,130	0,014	0,050
240	0,112	0,035	0,068	0,111	0,127	0,111	0,022	0,068
260	0,146	0,033	0,097	0,132	0,138	0,146	0,014	0,098
280	0,284	0,075	0,109	0,096	0,137	0,281	0,072	0,107
300	0,189	0,110	0,127	0,084	0,104	0,190	0,105	0,124
320	0,212	0,092	0,118	0,110	0,116	0,213	0,097	0,116
340	0,417	0,060	0,184	0,118	0,152	0,413	0,090	0,184
360	0,537	0,088	0,230	0,116	0,148	0,531	0,089	0,235
380	0,569	0,152	0,257	0,112	0,145	0,562	0,139	0,252
400	0,656	0,259	0,345	0,156	0,135	0,645	0,226	0,340
420	0,726	0,247	0,407	0,202	0,162	0,717	0,270	0,401

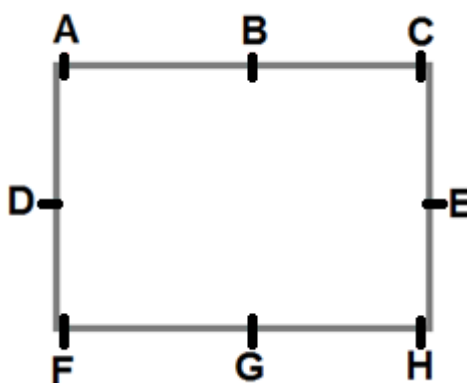
Comboio HSLM-A9								
Deslocamentos negativos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,365	-0,489	-0,338	-0,079	-0,070	-0,355	-0,150	-0,323
220	-0,426	-0,495	-0,398	-0,091	-0,094	-0,410	-0,162	-0,382
240	-0,367	-0,516	-0,390	-0,106	-0,104	-0,350	-0,165	-0,378
260	-0,490	-0,544	-0,351	-0,110	-0,111	-0,475	-0,188	-0,334
280	-0,509	-0,563	-0,357	-0,092	-0,101	-0,494	-0,182	-0,341
300	-0,427	-0,552	-0,501	-0,100	-0,103	-0,414	-0,200	-0,481
320	-0,465	-0,540	-0,437	-0,099	-0,100	-0,454	-0,209	-0,424
340	-0,533	-0,540	-0,397	-0,126	-0,109	-0,516	-0,209	-0,386
360	-0,646	-0,606	-0,474	-0,144	-0,117	-0,641	-0,261	-0,465
380	-0,783	-0,693	-0,551	-0,153	-0,124	-0,779	-0,334	-0,542
400	-0,818	-0,773	-0,463	-0,166	-0,136	-0,816	-0,381	-0,441
420	-0,813	-0,733	-0,544	-0,188	-0,160	-0,808	-0,485	-0,529

Comboio HSLM-A10								
Deslocamentos positivos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,073	0,024	0,053	0,069	0,083	0,073	0,015	0,053
220	0,123	0,031	0,063	0,087	0,113	0,122	0,016	0,064
240	0,112	0,038	0,069	0,090	0,119	0,112	0,028	0,068
260	0,171	0,033	0,105	0,125	0,123	0,172	0,014	0,106
280	0,247	0,029	0,090	0,102	0,136	0,245	0,021	0,090
300	0,197	0,078	0,157	0,073	0,112	0,195	0,097	0,153
320	0,202	0,101	0,134	0,087	0,092	0,203	0,106	0,132
340	0,404	0,050	0,157	0,142	0,143	0,399	0,108	0,158
360	0,510	0,103	0,229	0,162	0,186	0,504	0,109	0,235
380	0,545	0,134	0,192	0,126	0,162	0,538	0,152	0,192
400	0,627	0,253	0,326	0,136	0,150	0,617	0,226	0,320
420	0,769	0,315	0,414	0,193	0,152	0,758	0,289	0,409

Comboio HSLM-A10								
Deslocamentos negativos (mm)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,353	-0,490	-0,349	-0,091	-0,069	-0,342	-0,149	-0,334
220	-0,424	-0,502	-0,386	-0,105	-0,090	-0,408	-0,149	-0,371
240	-0,376	-0,509	-0,372	-0,117	-0,111	-0,359	-0,153	-0,362
260	-0,458	-0,528	-0,364	-0,137	-0,134	-0,444	-0,183	-0,349
280	-0,519	-0,553	-0,383	-0,120	-0,130	-0,502	-0,198	-0,371
300	-0,430	-0,533	-0,449	-0,097	-0,112	-0,423	-0,198	-0,432
320	-0,471	-0,542	-0,453	-0,101	-0,106	-0,460	-0,209	-0,439
340	-0,543	-0,528	-0,375	-0,126	-0,126	-0,527	-0,205	-0,366
360	-0,620	-0,612	-0,447	-0,164	-0,129	-0,613	-0,244	-0,438
380	-0,781	-0,711	-0,468	-0,134	-0,107	-0,775	-0,349	-0,462
400	-0,849	-0,769	-0,464	-0,154	-0,112	-0,845	-0,416	-0,453
420	-0,837	-0,727	-0,571	-0,176	-0,143	-0,834	-0,461	-0,557

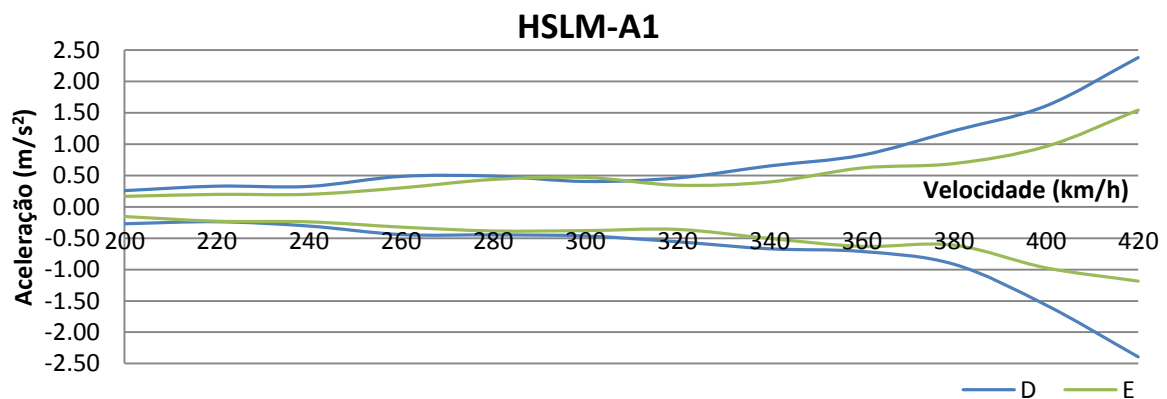
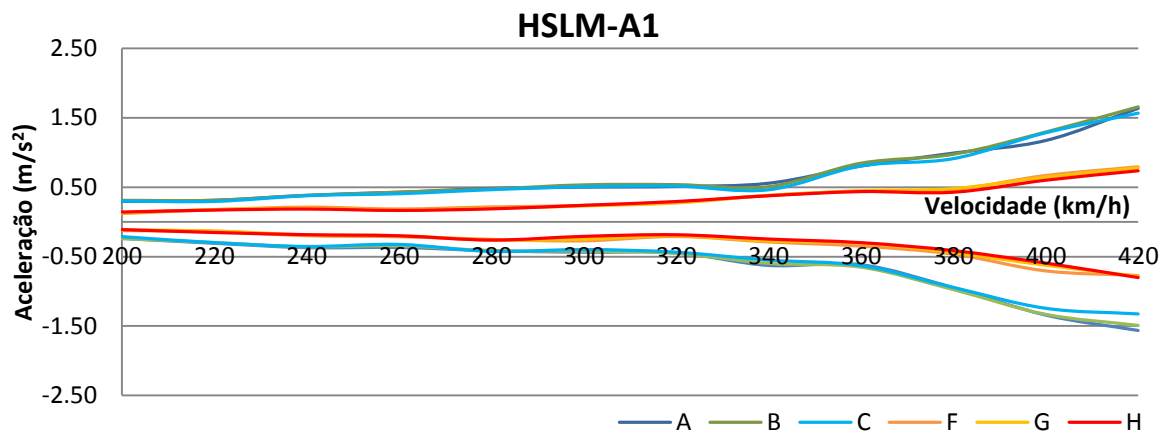
Anexo A6

ACELERAÇÕES NAS SECÇÕES (A; B; C; D; E; F; G; H)



Comboio HSLM-A1								
Acelerações positivas (m/s ²)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,296	0,311	0,300	0,258	0,167	0,121	0,131	0,142
220	0,312	0,311	0,295	0,329	0,198	0,177	0,178	0,171
240	0,381	0,384	0,378	0,325	0,199	0,213	0,194	0,186
260	0,427	0,428	0,406	0,485	0,301	0,186	0,172	0,166
280	0,482	0,474	0,464	0,490	0,437	0,216	0,195	0,188
300	0,501	0,534	0,507	0,404	0,468	0,236	0,231	0,240
320	0,511	0,537	0,516	0,461	0,345	0,284	0,274	0,293
340	0,557	0,507	0,463	0,652	0,396	0,381	0,381	0,377
360	0,805	0,846	0,806	0,823	0,619	0,447	0,449	0,437
380	0,991	0,974	0,912	1,213	0,689	0,469	0,480	0,428
400	1,173	1,295	1,284	1,610	0,963	0,668	0,646	0,601
420	1,636	1,658	1,567	2,380	1,543	0,794	0,779	0,737

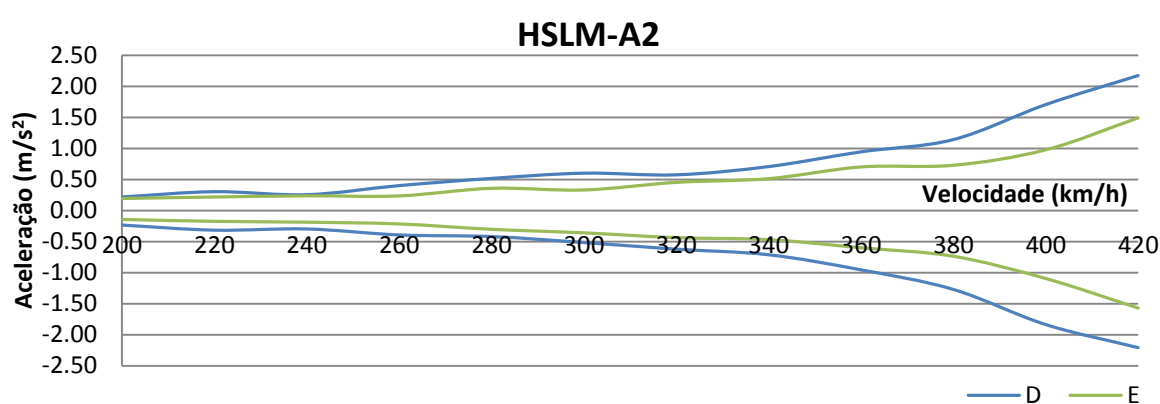
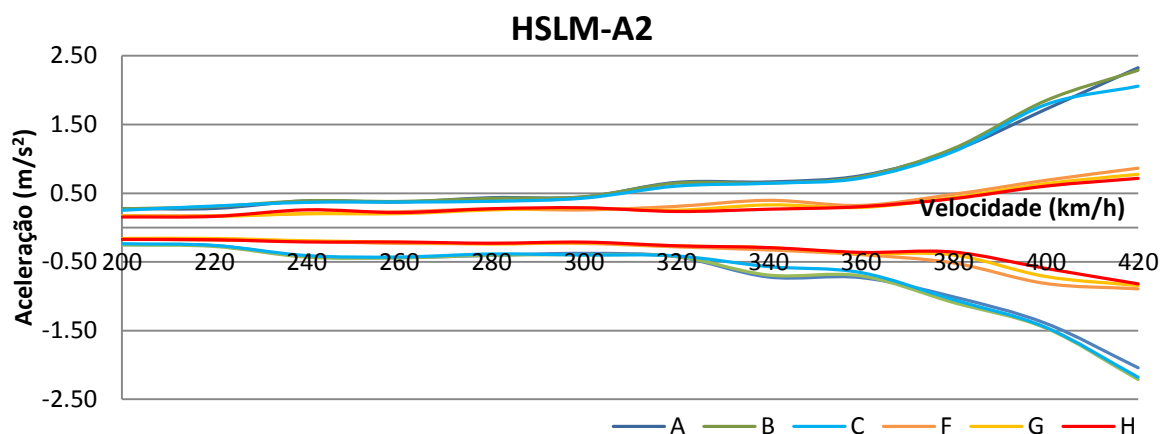
Comboio HSLM-A1								
Acelerações negativas (m/s ²)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,238	-0,239	-0,212	-0,270	-0,155	-0,125	-0,113	-0,111
220	-0,307	-0,297	-0,298	-0,238	-0,229	-0,134	-0,131	-0,152
240	-0,370	-0,359	-0,354	-0,307	-0,240	-0,198	-0,187	-0,184
260	-0,368	-0,344	-0,324	-0,443	-0,324	-0,213	-0,199	-0,200
280	-0,415	-0,414	-0,425	-0,447	-0,385	-0,252	-0,261	-0,261
300	-0,436	-0,422	-0,397	-0,465	-0,380	-0,272	-0,249	-0,208
320	-0,445	-0,454	-0,436	-0,558	-0,361	-0,210	-0,198	-0,185
340	-0,626	-0,598	-0,550	-0,670	-0,505	-0,288	-0,275	-0,247
360	-0,617	-0,652	-0,629	-0,712	-0,631	-0,348	-0,308	-0,299
380	-0,947	-0,975	-0,943	-0,916	-0,611	-0,464	-0,443	-0,413
400	-1,342	-1,331	-1,245	-1,567	-0,973	-0,705	-0,624	-0,593
420	-1,564	-1,491	-1,325	-2,393	-1,185	-0,772	-0,784	-0,802



Anexo A6.1 - Acelerações máximas positivas e negativas para cada das secções a analisar a) Acelerações verticais b) Acelerações horizontais

Comboio HSLM-A2								
Acelerações positivas (m/s ²)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,277	0,272	0,252	0,219	0,196	0,173	0,167	0,153
220	0,278	0,306	0,314	0,305	0,219	0,173	0,163	0,163
240	0,389	0,389	0,366	0,256	0,238	0,205	0,200	0,258
260	0,371	0,380	0,372	0,402	0,237	0,230	0,202	0,219
280	0,435	0,424	0,382	0,519	0,359	0,271	0,256	0,273
300	0,445	0,448	0,428	0,603	0,332	0,257	0,280	0,287
320	0,657	0,647	0,603	0,576	0,455	0,308	0,252	0,234
340	0,664	0,648	0,644	0,709	0,515	0,396	0,330	0,267
360	0,755	0,740	0,719	0,947	0,704	0,322	0,293	0,304
380	1,118	1,150	1,105	1,145	0,731	0,483	0,436	0,421
400	1,722	1,848	1,790	1,709	0,979	0,688	0,639	0,603
420	2,327	2,291	2,059	2,176	1,494	0,865	0,776	0,716

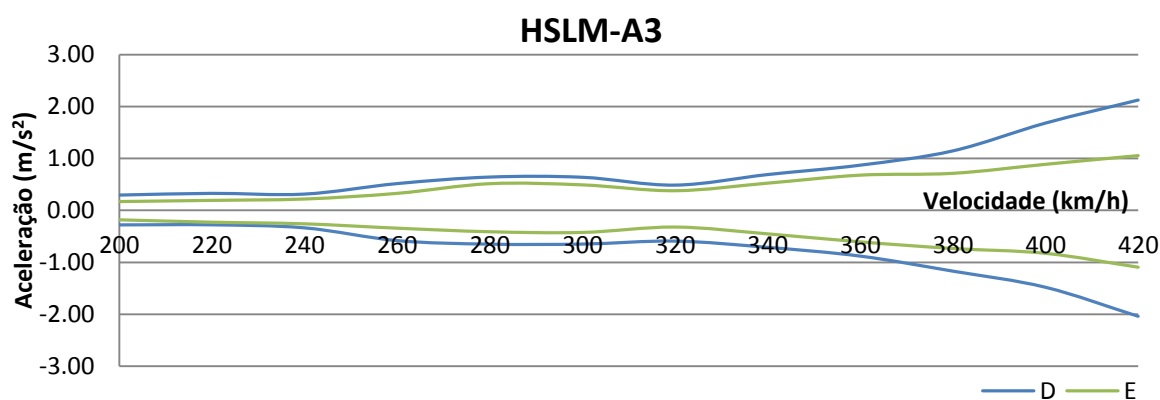
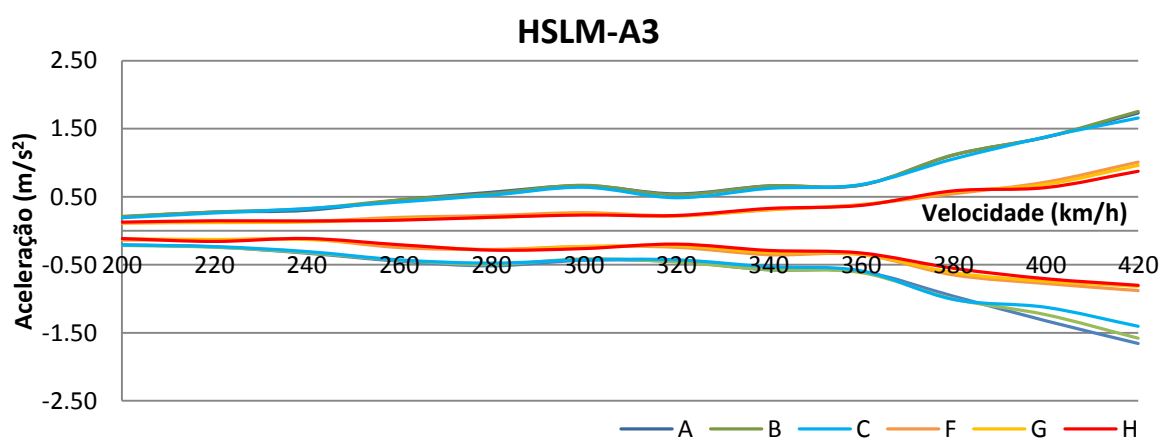
Comboio HSLM-A2								
Acelerações negativas (m/s ²)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,249	-0,253	-0,236	-0,233	-0,143	-0,168	-0,159	-0,172
220	-0,263	-0,276	-0,261	-0,315	-0,173	-0,183	-0,159	-0,178
240	-0,423	-0,431	-0,408	-0,296	-0,187	-0,200	-0,193	-0,210
260	-0,438	-0,442	-0,429	-0,392	-0,215	-0,231	-0,214	-0,211
280	-0,406	-0,403	-0,385	-0,419	-0,302	-0,233	-0,240	-0,229
300	-0,376	-0,398	-0,400	-0,515	-0,359	-0,232	-0,223	-0,212
320	-0,425	-0,420	-0,413	-0,622	-0,436	-0,282	-0,268	-0,266
340	-0,721	-0,692	-0,569	-0,712	-0,468	-0,326	-0,293	-0,293
360	-0,729	-0,703	-0,656	-0,955	-0,599	-0,395	-0,378	-0,362
380	-1,009	-1,092	-1,051	-1,271	-0,736	-0,516	-0,399	-0,357
400	-1,395	-1,464	-1,453	-1,837	-1,094	-0,815	-0,713	-0,595
420	-2,042	-2,213	-2,180	-2,209	-1,570	-0,893	-0,845	-0,820



Anexo A6.2 - Acelerações máximas positivas e negativas para cada das secções a analisar a) Acelerações verticais b) Acelerações horizontais

Comboio HSLM-A3								
Acelerações positivas (m/s^2)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,205	0,212	0,192	0,295	0,170	0,113	0,119	0,127
220	0,275	0,277	0,262	0,328	0,193	0,131	0,121	0,147
240	0,301	0,323	0,326	0,314	0,219	0,138	0,130	0,145
260	0,451	0,453	0,423	0,516	0,328	0,197	0,176	0,156
280	0,567	0,546	0,524	0,642	0,515	0,224	0,195	0,199
300	0,664	0,669	0,640	0,638	0,492	0,266	0,247	0,232
320	0,543	0,530	0,486	0,487	0,379	0,222	0,216	0,225
340	0,660	0,660	0,623	0,691	0,525	0,307	0,313	0,328
360	0,671	0,674	0,680	0,871	0,679	0,386	0,380	0,373
380	1,114	1,116	1,056	1,147	0,714	0,545	0,571	0,587
400	1,375	1,378	1,381	1,682	0,888	0,716	0,683	0,635
420	1,732	1,755	1,659	2,125	1,055	1,010	0,962	0,875

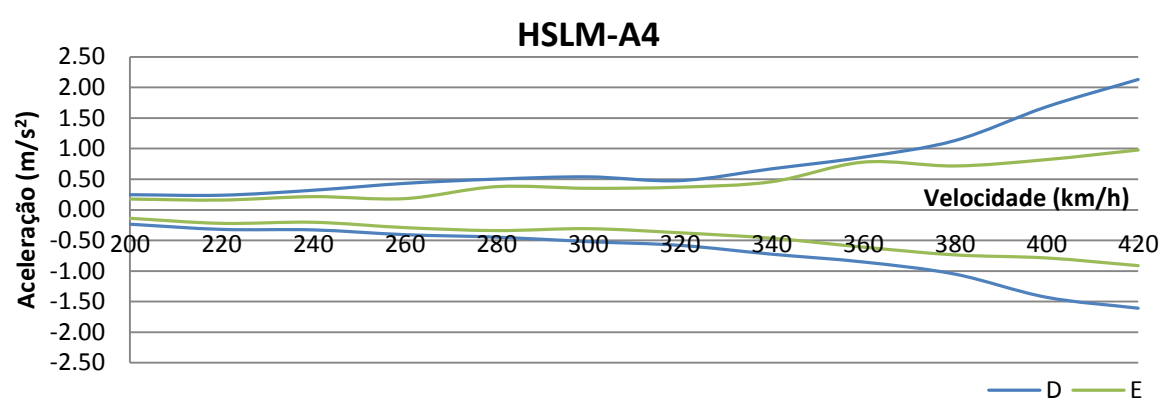
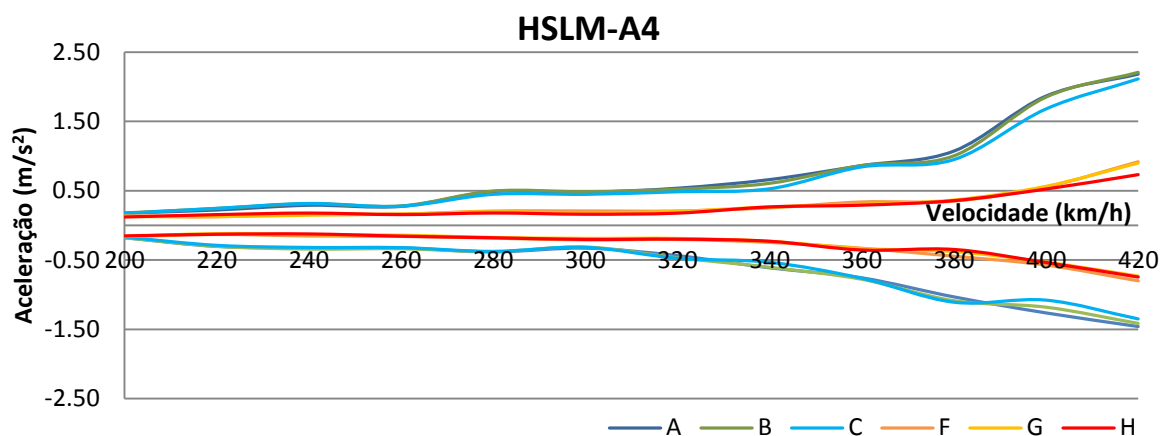
Comboio HSLM-A3								
Acelerações negativas (m/s ²)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,205	-0,215	-0,208	-0,279	-0,181	-0,137	-0,117	-0,114
220	-0,237	-0,242	-0,231	-0,278	-0,227	-0,132	-0,128	-0,156
240	-0,329	-0,320	-0,305	-0,336	-0,259	-0,120	-0,128	-0,113
260	-0,446	-0,433	-0,427	-0,581	-0,342	-0,246	-0,210	-0,205
280	-0,515	-0,496	-0,475	-0,650	-0,411	-0,274	-0,277	-0,284
300	-0,433	-0,412	-0,427	-0,648	-0,424	-0,230	-0,234	-0,262
320	-0,451	-0,458	-0,427	-0,591	-0,321	-0,242	-0,219	-0,196
340	-0,573	-0,573	-0,528	-0,711	-0,452	-0,351	-0,320	-0,288
360	-0,598	-0,614	-0,588	-0,880	-0,606	-0,350	-0,343	-0,326
380	-0,961	-1,002	-1,009	-1,170	-0,734	-0,648	-0,615	-0,551
400	-1,323	-1,233	-1,125	-1,481	-0,826	-0,775	-0,743	-0,704
420	-1,657	-1,579	-1,404	-2,039	-1,094	-0,879	-0,815	-0,801



Anexo A6.3 - Acelerações máximas positivas e negativas para cada das secções a analisar a) Acelerações verticais b) Acelerações horizontais

Comboio HSLM-A4								
Acelerações positivas (m/s ²)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,176	0,179	0,172	0,247	0,176	0,139	0,127	0,121
220	0,222	0,244	0,245	0,239	0,160	0,125	0,126	0,155
240	0,290	0,312	0,316	0,321	0,216	0,168	0,147	0,177
260	0,274	0,280	0,276	0,433	0,184	0,163	0,163	0,155
280	0,488	0,495	0,447	0,502	0,379	0,206	0,195	0,178
300	0,477	0,485	0,447	0,539	0,352	0,208	0,178	0,160
320	0,536	0,521	0,485	0,478	0,371	0,208	0,202	0,177
340	0,660	0,607	0,527	0,670	0,459	0,253	0,265	0,266
360	0,862	0,863	0,843	0,860	0,780	0,338	0,304	0,291
380	1,071	1,003	0,949	1,132	0,717	0,350	0,366	0,356
400	1,865	1,850	1,679	1,684	0,821	0,555	0,563	0,524
420	2,182	2,208	2,113	2,131	0,978	0,917	0,899	0,732

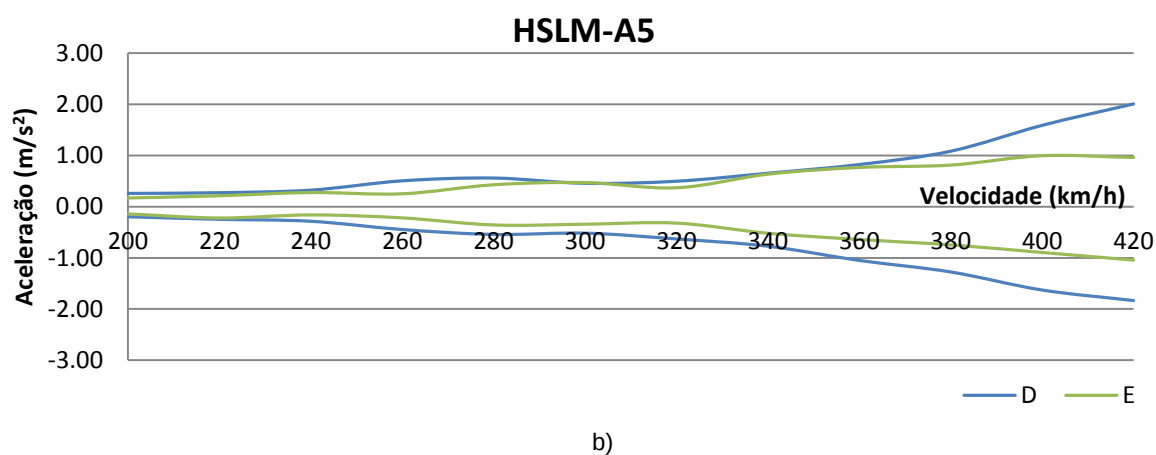
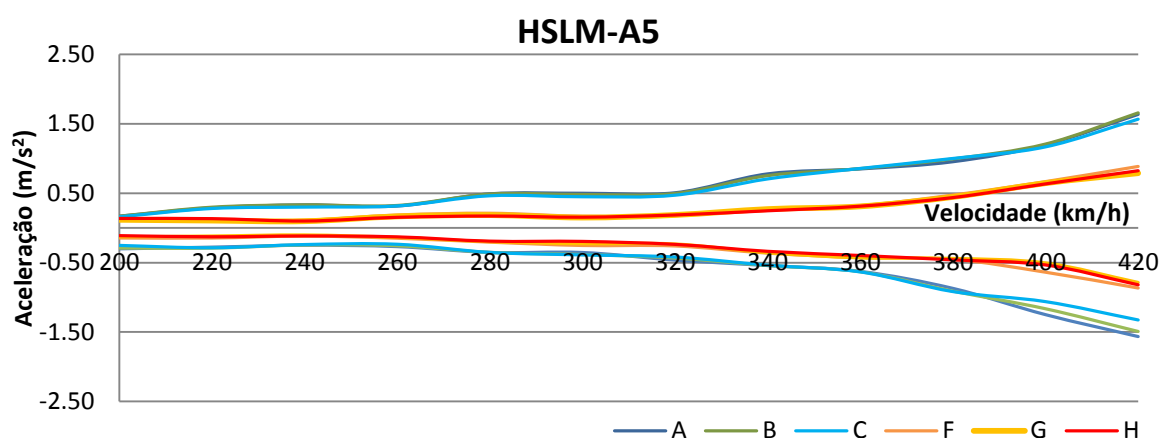
Comboio HSLM-A4								
Acelerações negativas (m/s ²)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,152	-0,179	-0,169	-0,235	-0,139	-0,164	-0,160	-0,152
220	-0,128	-0,303	-0,288	-0,320	-0,221	-0,131	-0,119	-0,128
240	-0,323	-0,342	-0,319	-0,328	-0,203	-0,153	-0,134	-0,124
260	-0,326	-0,338	-0,321	-0,406	-0,290	-0,159	-0,141	-0,156
280	-0,383	-0,379	-0,375	-0,446	-0,339	-0,184	-0,174	-0,179
300	-0,329	-0,313	-0,317	-0,520	-0,308	-0,210	-0,188	-0,203
320	-0,437	-0,467	-0,476	-0,581	-0,375	-0,204	-0,189	-0,199
340	-0,613	-0,605	-0,533	-0,725	-0,464	-0,245	-0,230	-0,230
360	-0,757	-0,778	-0,763	-0,852	-0,610	-0,330	-0,336	-0,356
380	-1,032	-1,087	-1,109	-1,050	-0,736	-0,445	-0,378	-0,348
400	-1,263	-1,181	-1,079	-1,429	-0,787	-0,573	-0,531	-0,536
420	-1,460	-1,414	-1,350	-1,608	-0,912	-0,800	-0,732	-0,746



Anexo A6.4 - Acelerações máximas positivas e negativas para cada das secções a analisar a) Acelerações verticais b) Acelerações horizontais

Comboio HSLM-A5								
Acelerações positivas (m/s^2)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,169	0,299	0,160	0,258	0,169	0,109	0,117	0,136
220	0,289	0,169	0,280	0,272	0,212	0,112	0,106	0,134
240	0,332	0,332	0,300	0,323	0,276	0,111	0,097	0,099
260	0,315	0,324	0,317	0,504	0,251	0,186	0,166	0,153
280	0,491	0,488	0,463	0,559	0,427	0,211	0,185	0,171
300	0,499	0,481	0,449	0,455	0,470	0,169	0,149	0,154
320	0,506	0,496	0,471	0,497	0,369	0,177	0,186	0,186
340	0,778	0,753	0,706	0,652	0,634	0,272	0,271	0,247
360	0,850	0,854	0,857	0,823	0,766	0,321	0,310	0,313
380	0,954	0,994	1,001	1,083	0,812	0,473	0,446	0,437
400	1,197	1,208	1,168	1,588	0,995	0,667	0,645	0,634
420	1,636	1,658	1,567	2,007	0,961	0,886	0,789	0,824

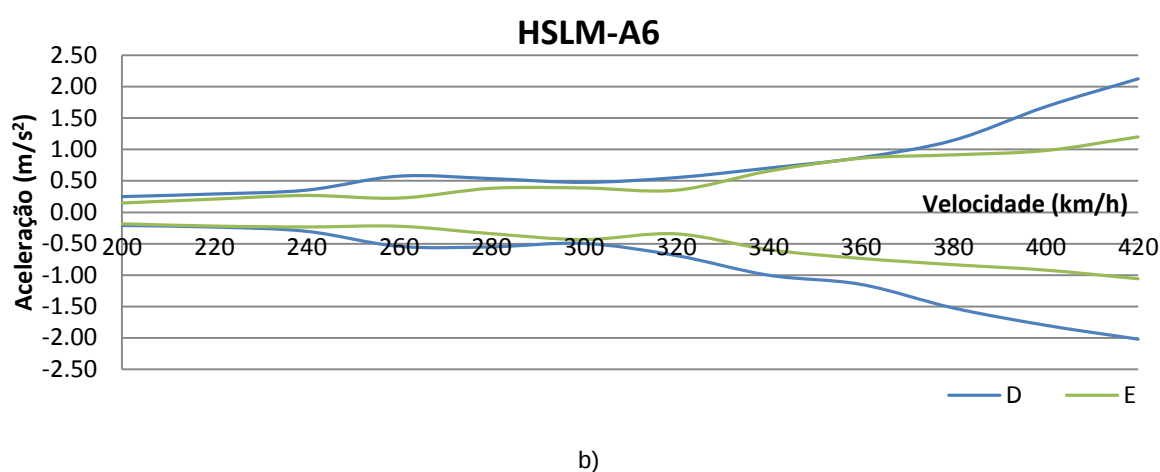
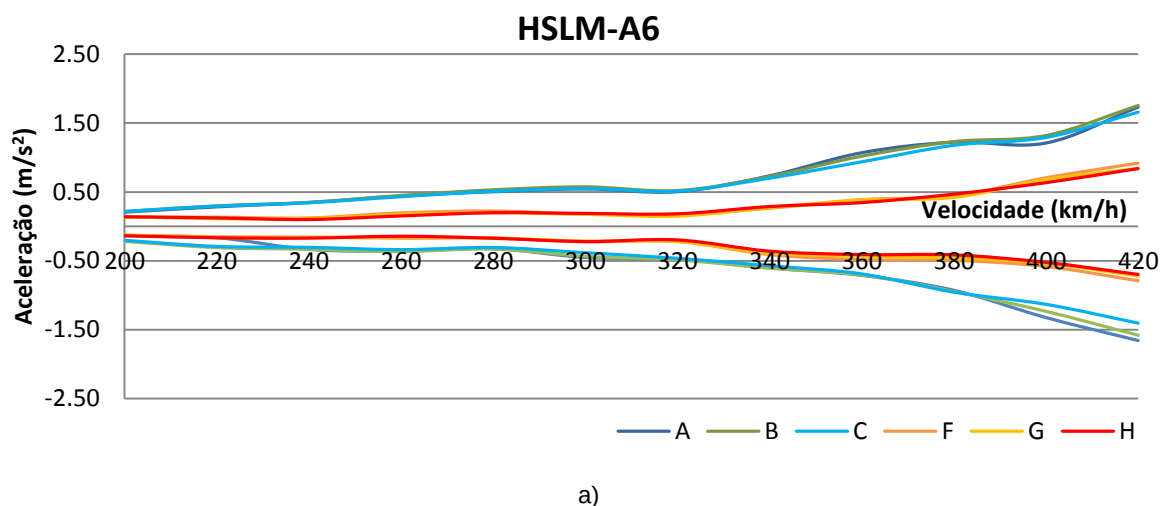
Comboio HSLM-A5								
Acelerações negativas (m/s^2)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,301	-0,290	-0,252	-0,198	-0,142	-0,145	-0,128	-0,111
220	-0,128	-0,291	-0,286	-0,248	-0,222	-0,146	-0,117	-0,128
240	-0,249	-0,246	-0,240	-0,286	-0,161	-0,117	-0,101	-0,116
260	-0,269	-0,257	-0,235	-0,447	-0,220	-0,148	-0,136	-0,129
280	-0,353	-0,353	-0,353	-0,543	-0,358	-0,205	-0,198	-0,191
300	-0,354	-0,383	-0,389	-0,518	-0,343	-0,253	-0,228	-0,194
320	-0,463	-0,434	-0,419	-0,631	-0,321	-0,260	-0,231	-0,237
340	-0,542	-0,541	-0,537	-0,773	-0,520	-0,363	-0,358	-0,337
360	-0,626	-0,631	-0,634	-1,051	-0,642	-0,428	-0,431	-0,397
380	-0,871	-0,911	-0,917	-1,277	-0,747	-0,452	-0,439	-0,460
400	-1,249	-1,164	-1,062	-1,629	-0,896	-0,638	-0,504	-0,534
420	-1,565	-1,492	-1,326	-1,835	-1,044	-0,866	-0,786	-0,819



Anexo A6.5 - Acelerações máximas positivas e negativas para cada uma das secções a analisar a) Acelerações verticais b) Acelerações horizontais

Comboio HSLM-A6								
Acelerações positivas (m/s ²)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,207	0,216	0,217	0,250	0,148	0,135	0,142	0,140
220	0,284	0,299	0,295	0,292	0,211	0,134	0,112	0,123
240	0,347	0,349	0,343	0,353	0,268	0,124	0,114	0,100
260	0,442	0,449	0,431	0,576	0,227	0,197	0,176	0,153
280	0,504	0,532	0,510	0,536	0,382	0,224	0,198	0,199
300	0,544	0,575	0,549	0,477	0,388	0,179	0,175	0,189
320	0,504	0,521	0,513	0,553	0,352	0,180	0,150	0,183
340	0,734	0,724	0,701	0,704	0,656	0,263	0,272	0,289
360	1,070	1,020	0,938	0,871	0,860	0,389	0,385	0,346
380	1,223	1,231	1,178	1,147	0,915	0,443	0,421	0,469
400	1,211	1,320	1,292	1,682	0,984	0,706	0,683	0,635
420	1,732	1,755	1,659	2,125	1,201	0,919	0,841	0,840

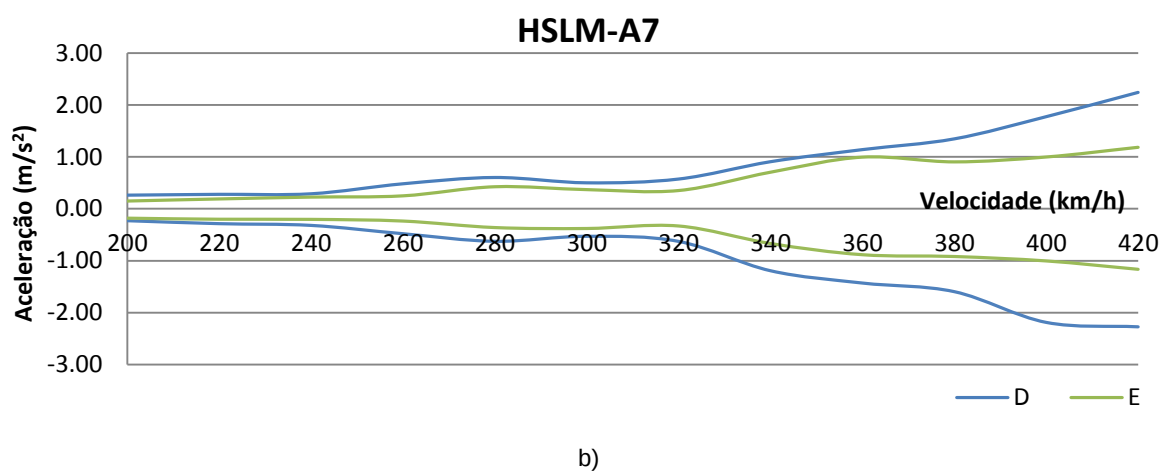
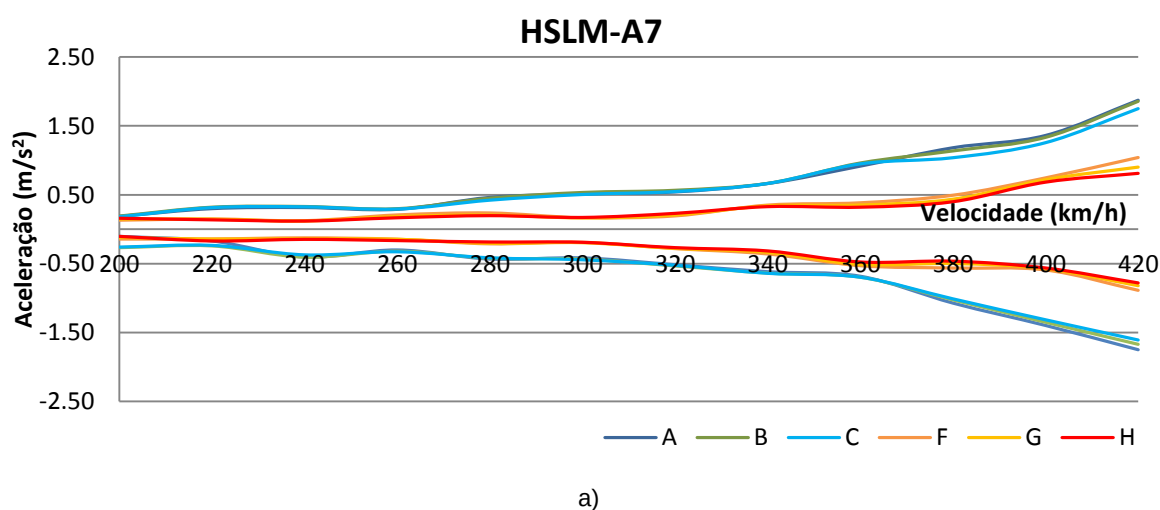
Comboio HSLM-A6								
Acelerações negativas (m/s ²)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,135	-0,217	-0,202	-0,210	-0,183	-0,128	-0,126	-0,135
220	-0,165	-0,307	-0,290	-0,235	-0,219	-0,151	-0,162	-0,165
240	-0,333	-0,332	-0,304	-0,303	-0,233	-0,155	-0,162	-0,170
260	-0,358	-0,366	-0,337	-0,542	-0,221	-0,171	-0,150	-0,142
280	-0,324	-0,327	-0,306	-0,550	-0,340	-0,168	-0,168	-0,172
300	-0,451	-0,435	-0,382	-0,496	-0,433	-0,223	-0,213	-0,219
320	-0,478	-0,486	-0,463	-0,688	-0,343	-0,220	-0,218	-0,196
340	-0,602	-0,607	-0,571	-1,001	-0,595	-0,408	-0,390	-0,359
360	-0,711	-0,706	-0,689	-1,147	-0,734	-0,483	-0,432	-0,408
380	-0,927	-0,945	-0,954	-1,523	-0,834	-0,492	-0,456	-0,413
400	-1,323	-1,233	-1,131	-1,798	-0,920	-0,581	-0,536	-0,522
420	-1,657	-1,579	-1,404	-2,019	-1,058	-0,788	-0,717	-0,697



Anexo A6.6 - Acelerações máximas positivas e negativas para cada uma das secções a analisar a) Acelerações verticais b) Acelerações horizontais

Comboio HSLM-A7								
Acelerações positivas (m/s^2)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,187	0,191	0,182	0,263	0,150	0,131	0,149	0,160
220	0,299	0,320	0,314	0,279	0,190	0,150	0,146	0,137
240	0,315	0,330	0,325	0,290	0,225	0,124	0,119	0,119
260	0,289	0,298	0,293	0,482	0,250	0,208	0,185	0,167
280	0,462	0,451	0,422	0,603	0,425	0,236	0,206	0,197
300	0,514	0,534	0,504	0,501	0,370	0,168	0,165	0,171
320	0,542	0,565	0,547	0,573	0,352	0,194	0,207	0,231
340	0,663	0,666	0,665	0,908	0,705	0,351	0,339	0,328
360	0,917	0,962	0,949	1,140	0,996	0,384	0,352	0,320
380	1,183	1,137	1,038	1,347	0,904	0,494	0,436	0,399
400	1,361	1,334	1,257	1,775	0,998	0,746	0,721	0,684
420	1,873	1,857	1,751	2,243	1,185	1,041	0,902	0,811

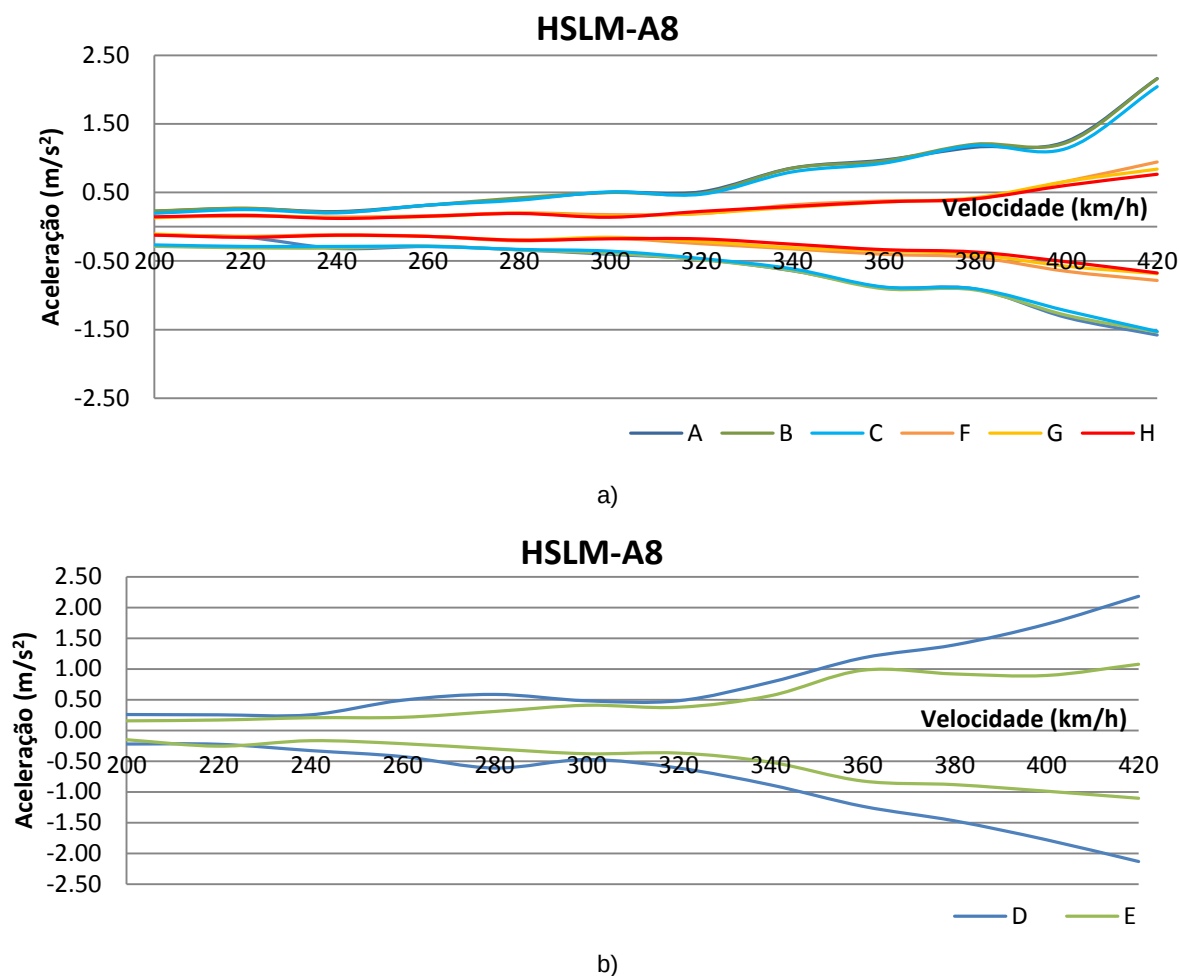
Comboio HSLM-A7								
Acelerações negativas (m/s ²)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,104	-0,267	-0,259	-0,229	-0,181	-0,142	-0,120	-0,104
220	-0,170	-0,242	-0,234	-0,287	-0,201	-0,141	-0,143	-0,170
240	-0,403	-0,405	-0,372	-0,320	-0,204	-0,125	-0,138	-0,147
260	-0,301	-0,319	-0,327	-0,480	-0,236	-0,145	-0,145	-0,165
280	-0,432	-0,420	-0,415	-0,626	-0,361	-0,212	-0,205	-0,185
300	-0,416	-0,433	-0,443	-0,529	-0,379	-0,189	-0,195	-0,190
320	-0,515	-0,532	-0,524	-0,628	-0,331	-0,281	-0,278	-0,267
340	-0,617	-0,637	-0,639	-1,193	-0,669	-0,359	-0,336	-0,315
360	-0,682	-0,697	-0,697	-1,430	-0,885	-0,529	-0,511	-0,475
380	-1,072	-1,026	-1,010	-1,597	-0,919	-0,563	-0,497	-0,463
400	-1,396	-1,350	-1,314	-2,188	-1,004	-0,591	-0,573	-0,562
420	-1,749	-1,670	-1,608	-2,274	-1,166	-0,886	-0,819	-0,779



Anexo A6.7 - Acelerações máximas positivas e negativas para cada uma das secções a analisar a) Acelerações verticais b) Acelerações horizontais

Comboio HSLM-A8								
Acelerações positivas (m/s ²)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,226	0,229	0,195	0,258	0,155	0,141	0,130	0,144
220	0,266	0,270	0,250	0,254	0,169	0,154	0,167	0,166
240	0,221	0,210	0,202	0,253	0,206	0,141	0,133	0,121
260	0,313	0,313	0,315	0,491	0,213	0,159	0,148	0,153
280	0,404	0,421	0,387	0,585	0,308	0,202	0,197	0,193
300	0,502	0,498	0,509	0,481	0,409	0,175	0,157	0,138
320	0,509	0,487	0,473	0,483	0,376	0,192	0,196	0,224
340	0,856	0,853	0,800	0,785	0,564	0,319	0,283	0,295
360	0,972	0,958	0,926	1,179	0,978	0,375	0,359	0,362
380	1,159	1,203	1,185	1,391	0,918	0,405	0,422	0,407
400	1,241	1,223	1,139	1,729	0,894	0,660	0,659	0,602
420	2,160	2,157	2,042	2,182	1,077	0,944	0,840	0,765

Comboio HSLM-A8								
Acelerações negativas (m/s ²)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,122	-0,286	-0,265	-0,222	-0,152	-0,120	-0,107	-0,122
220	-0,155	-0,308	-0,287	-0,226	-0,256	-0,141	-0,147	-0,155
240	-0,316	-0,311	-0,287	-0,328	-0,168	-0,116	-0,129	-0,124
260	-0,289	-0,281	-0,285	-0,426	-0,216	-0,140	-0,140	-0,141
280	-0,336	-0,337	-0,331	-0,612	-0,302	-0,206	-0,193	-0,197
300	-0,403	-0,386	-0,356	-0,474	-0,380	-0,169	-0,154	-0,176
320	-0,476	-0,482	-0,464	-0,613	-0,369	-0,248	-0,215	-0,178
340	-0,643	-0,641	-0,614	-0,887	-0,518	-0,323	-0,306	-0,256
360	-0,884	-0,904	-0,878	-1,235	-0,824	-0,403	-0,351	-0,334
380	-0,906	-0,922	-0,905	-1,472	-0,883	-0,447	-0,405	-0,369
400	-1,323	-1,289	-1,224	-1,780	-0,989	-0,650	-0,576	-0,511
420	-1,579	-1,536	-1,526	-2,133	-1,104	-0,784	-0,685	-0,674



Anexo A6.8 - Acelerações máximas positivas e negativas para cada uma das secções a analisar a) Acelerações verticais b) Acelerações horizontais

Comboio HSLM-A9								
Acelerações positivas (m/s^2)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,250	0,267	0,247	0,308	0,178	0,142	0,148	0,147
220	0,299	0,309	0,290	0,284	0,236	0,137	0,144	0,160
240	0,416	0,432	0,409	0,278	0,250	0,140	0,151	0,156
260	0,354	0,339	0,316	0,512	0,306	0,230	0,205	0,178
280	0,498	0,507	0,473	0,714	0,424	0,261	0,228	0,212
300	0,586	0,611	0,591	0,571	0,508	0,222	0,221	0,218
320	0,515	0,521	0,518	0,584	0,456	0,197	0,190	0,212
340	0,705	0,681	0,636	0,968	0,557	0,378	0,367	0,385
360	0,865	0,803	0,813	1,407	0,755	0,423	0,438	0,452
380	1,295	1,308	1,253	1,812	1,123	0,590	0,517	0,501
400	1,419	1,374	1,345	2,044	1,089	0,824	0,796	0,741
420	2,020	2,048	1,935	2,479	1,202	1,055	0,957	0,897

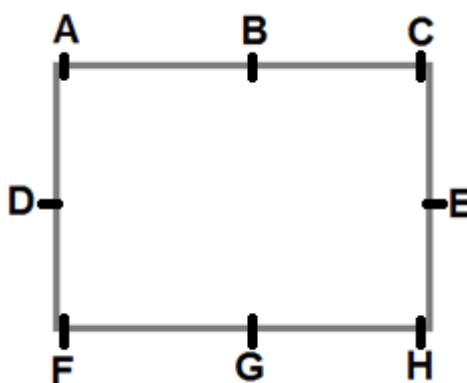
Comboio HSLM-A9								
Acelerações negativas (m/s ²)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,120	-0,222	-0,224	-0,245	-0,195	-0,147	-0,124	-0,120
220	-0,150	-0,266	-0,256	-0,258	-0,208	-0,147	-0,139	-0,150
240	-0,296	-0,301	-0,296	-0,353	-0,182	-0,150	-0,166	-0,184
260	-0,337	-0,347	-0,338	-0,421	-0,252	-0,183	-0,188	-0,201
280	-0,427	-0,423	-0,404	-0,650	-0,402	-0,186	-0,197	-0,216
300	-0,477	-0,504	-0,493	-0,638	-0,579	-0,214	-0,193	-0,192
320	-0,447	-0,427	-0,431	-0,741	-0,368	-0,252	-0,251	-0,229
340	-0,700	-0,681	-0,652	-1,246	-0,682	-0,430	-0,373	-0,353
360	-0,975	-0,978	-0,910	-1,440	-0,971	-0,530	-0,449	-0,352
380	-1,193	-1,235	-1,208	-1,869	-1,103	-0,622	-0,546	-0,526
400	-1,543	-1,438	-1,313	-2,147	-1,080	-0,896	-0,815	-0,697
420	-1,933	-1,842	-1,638	-2,889	-1,137	-0,913	-0,839	-0,848

Comboio HSLM-A10								
Acelerações positivas (m/s ²)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	0,231	0,245	0,242	0,291	0,218	0,141	0,151	0,145
220	0,299	0,297	0,286	0,283	0,187	0,147	0,133	0,134
240	0,291	0,301	0,297	0,277	0,255	0,162	0,142	0,128
260	0,396	0,418	0,404	0,439	0,340	0,230	0,205	0,178
280	0,557	0,551	0,518	0,669	0,409	0,261	0,228	0,212
300	0,612	0,629	0,605	0,551	0,503	0,204	0,203	0,203
320	0,551	0,541	0,520	0,605	0,483	0,224	0,212	0,221
340	0,697	0,679	0,640	0,885	0,490	0,387	0,372	0,329
360	0,890	0,899	0,867	1,326	0,755	0,468	0,455	0,409
380	1,100	1,120	1,057	1,779	0,904	0,532	0,454	0,419
400	1,371	1,352	1,343	2,213	1,003	0,853	0,796	0,741
420	2,020	2,048	1,935	2,479	1,182	1,024	0,957	0,897

Comboio HSLM-A10								
Acelerações negativas (m/s ²)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-0,149	-0,241	-0,220	-0,286	-0,173	-0,147	-0,129	-0,149
220	-0,175	-0,347	-0,323	-0,255	-0,183	-0,161	-0,161	-0,175
240	-0,315	-0,325	-0,306	-0,353	-0,239	-0,119	-0,115	-0,128
260	-0,332	-0,317	-0,293	-0,491	-0,311	-0,160	-0,147	-0,147
280	-0,374	-0,361	-0,371	-0,580	-0,444	-0,208	-0,214	-0,228
300	-0,492	-0,454	-0,412	-0,572	-0,458	-0,241	-0,242	-0,231
320	-0,472	-0,460	-0,437	-0,690	-0,389	-0,252	-0,251	-0,229
340	-0,737	-0,727	-0,591	-1,084	-0,573	-0,374	-0,338	-0,285
360	-0,872	-0,838	-0,833	-1,504	-0,777	-0,515	-0,453	-0,385
380	-1,101	-1,142	-1,146	-1,618	-0,928	-0,509	-0,461	-0,471
400	-1,543	-1,504	-1,451	-2,123	-1,046	-0,946	-0,825	-0,661
420	-1,933	-1,842	-1,735	-2,699	-1,249	-1,049	-0,967	-0,820

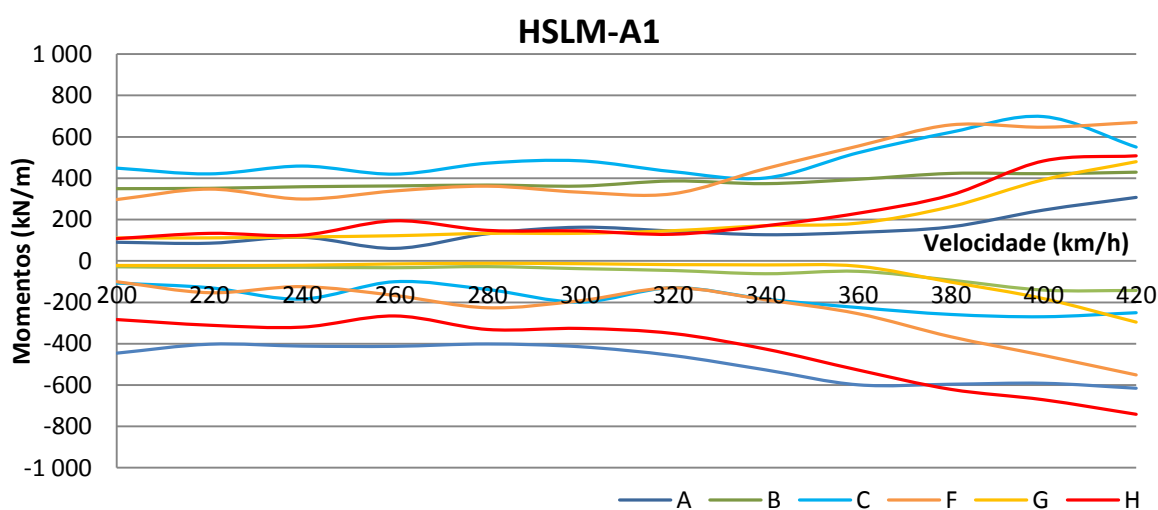
Anexo A7

MOMENTOS FLECTORES NAS SECÇÕES (A; B; C; D; E; F; G; H)



Comboio HSLM-A1								
Momentos positivos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	90,24	349,43	448,60	0,02	0,04	296,79	110,98	108,09
220	85,67	351,05	420,82	0,02	0,04	347,14	111,44	133,33
240	114,26	358,60	458,55	0,02	0,04	299,17	115,92	124,74
260	60,80	362,56	419,62	0,03	0,04	338,44	121,94	193,93
280	131,31	366,84	472,68	0,04	0,04	361,36	133,23	147,84
300	162,90	361,91	484,03	0,04	0,04	332,19	133,48	145,20
320	144,26	386,53	431,64	0,04	0,06	324,69	146,13	128,97
340	126,67	373,63	401,00	0,06	0,05	446,16	170,22	170,11
360	138,15	394,95	522,97	0,05	0,08	555,14	182,73	230,54
380	164,82	423,01	622,11	0,10	0,14	657,63	262,29	318,62
400	245,80	421,69	697,81	0,11	0,15	646,37	392,46	483,23
420	307,16	429,04	550,49	0,19	0,13	669,46	479,70	508,18

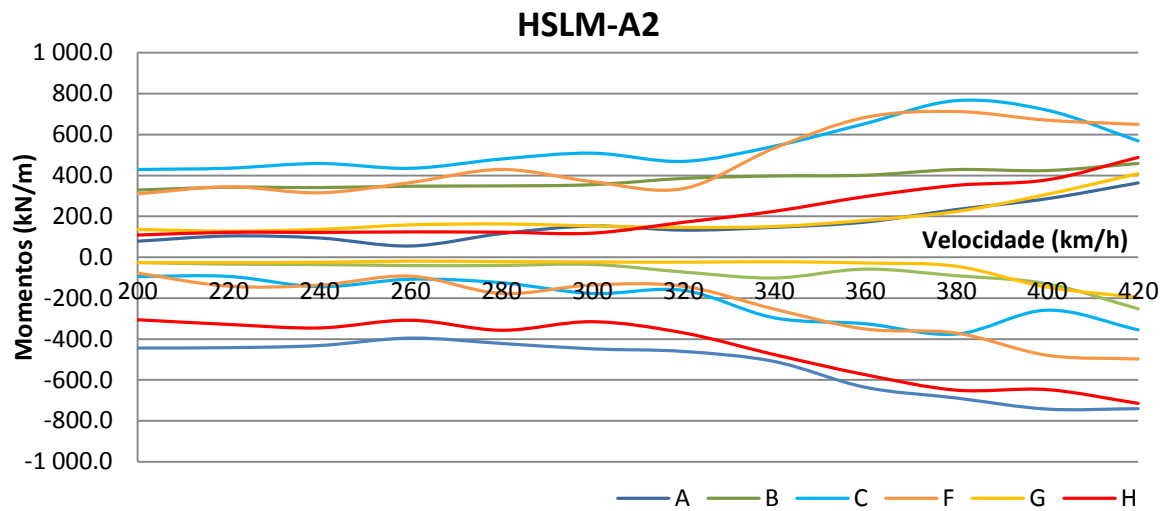
Comboio HSLM-A1								
Momentos negativos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-445,75	-28,46	-107,08	-0,03	-0,04	-100,53	-21,87	-283,39
220	-402,63	-31,21	-129,55	-0,03	-0,04	-153,59	-22,01	-310,73
240	-411,75	-30,58	-184,26	-0,03	-0,03	-124,35	-20,87	-319,88
260	-412,74	-32,85	-100,45	-0,03	-0,04	-166,94	-14,41	-266,01
280	-401,44	-27,43	-138,14	-0,04	-0,05	-226,28	-11,52	-331,24
300	-414,82	-37,42	-198,68	-0,04	-0,05	-192,32	-13,25	-326,24
320	-457,17	-46,27	-129,39	-0,05	-0,06	-130,10	-17,93	-350,63
340	-526,66	-61,85	-184,66	-0,07	-0,06	-187,89	-19,15	-425,92
360	-598,90	-50,30	-225,39	-0,07	-0,08	-255,02	-25,52	-527,30
380	-596,05	-92,98	-258,71	-0,09	-0,09	-366,51	-102,31	-620,82
400	-591,38	-140,88	-269,79	-0,17	-0,16	-456,66	-182,25	-671,08
420	-615,40	-142,90	-250,26	-0,18	-0,15	-551,09	-295,85	-741,34



Anexo A7.1 - Momentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar

Comboio HSLM-A2								
Momentos positivos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	78,53	328,73	429,12	0,03	0,04	310,24	135,88	108,68
220	104,01	342,50	435,54	0,03	0,03	344,56	127,92	121,81
240	94,25	340,85	458,43	0,03	0,05	315,39	136,56	121,62
260	55,12	347,44	435,02	0,03	0,05	365,48	158,50	123,98
280	115,48	349,01	480,47	0,03	0,05	429,43	162,83	122,56
300	152,86	354,87	509,09	0,05	0,07	369,89	153,36	117,95
320	132,64	385,52	468,90	0,05	0,07	335,71	145,90	170,90
340	146,33	397,60	543,07	0,07	0,07	533,56	150,29	224,70
360	172,17	401,03	653,71	0,08	0,11	683,88	179,94	296,65
380	233,32	428,75	765,97	0,12	0,13	712,64	223,52	351,72
400	286,38	424,02	719,12	0,16	0,16	670,34	307,82	378,53
420	363,58	458,64	568,92	0,21	0,16	649,59	408,72	488,39

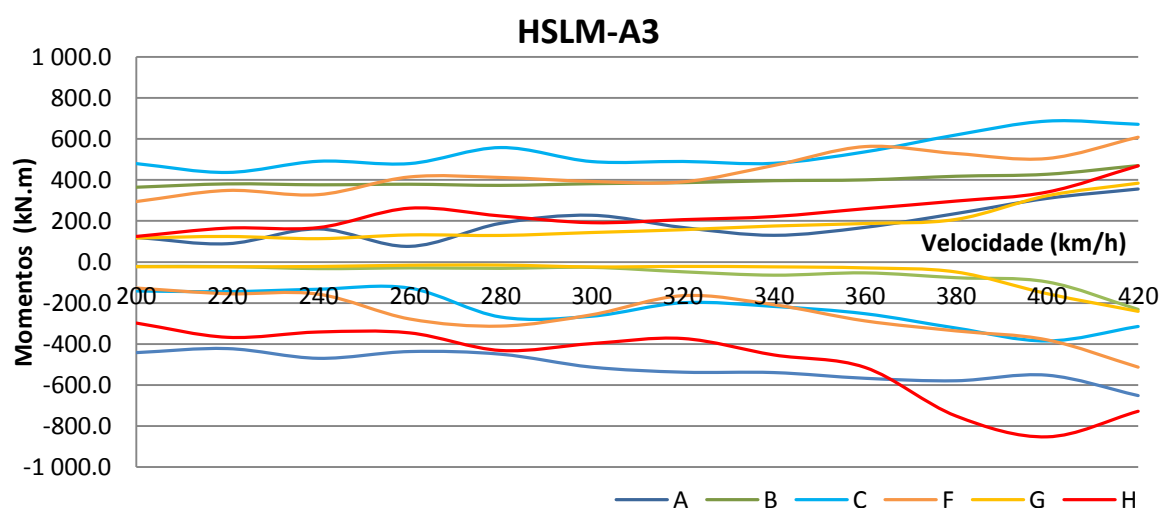
Comboio HSLM-A2								
Momentos negativos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-443,77	-25,48	-93,96	-0,02	-0,04	-77,41	-25,73	-305,50
220	-442,03	-33,58	-93,63	-0,04	-0,03	-141,45	-25,90	-328,42
240	-431,57	-35,62	-143,69	-0,04	-0,04	-136,22	-24,55	-345,60
260	-395,23	-40,77	-107,39	-0,04	-0,05	-92,31	-18,82	-307,88
280	-421,44	-40,03	-124,54	-0,05	-0,05	-177,10	-21,43	-357,00
300	-447,88	-35,05	-177,21	-0,05	-0,07	-135,46	-23,03	-315,10
320	-460,38	-72,00	-162,00	-0,06	-0,08	-141,82	-24,22	-369,48
340	-509,57	-101,46	-296,16	-0,07	-0,08	-253,35	-21,73	-475,87
360	-635,65	-57,91	-325,07	-0,09	-0,11	-350,87	-28,04	-574,09
380	-688,19	-90,22	-375,77	-0,11	-0,12	-370,57	-43,97	-649,83
400	-742,27	-129,82	-258,74	-0,21	-0,15	-479,04	-146,16	-647,22
420	-740,28	-251,94	-354,77	-0,22	-0,17	-497,55	-196,37	-714,36



Anexo A7.2 - Momentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar

Comboio HSLM-A3								
Momentos positivos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	120,09	364,52	479,64	0,02	0,03	294,75	117,02	124,55
220	89,07	380,86	436,62	0,03	0,04	348,85	124,46	165,14
240	161,12	376,40	491,21	0,02	0,04	328,35	113,65	167,72
260	76,11	379,08	479,86	0,04	0,04	414,63	131,96	262,30
280	188,50	373,55	558,07	0,03	0,05	412,06	129,38	224,40
300	227,88	381,75	489,66	0,04	0,06	392,77	143,62	191,55
320	168,32	386,63	490,17	0,05	0,05	390,60	157,36	206,33
340	130,06	396,37	481,23	0,07	0,07	470,71	175,53	221,71
360	168,78	400,35	536,91	0,07	0,08	562,71	187,54	259,75
380	236,23	418,01	619,40	0,09	0,10	529,03	207,61	297,03
400	310,05	427,82	686,97	0,13	0,15	504,51	323,01	340,88
420	355,89	470,06	671,26	0,22	0,13	608,54	384,23	468,71

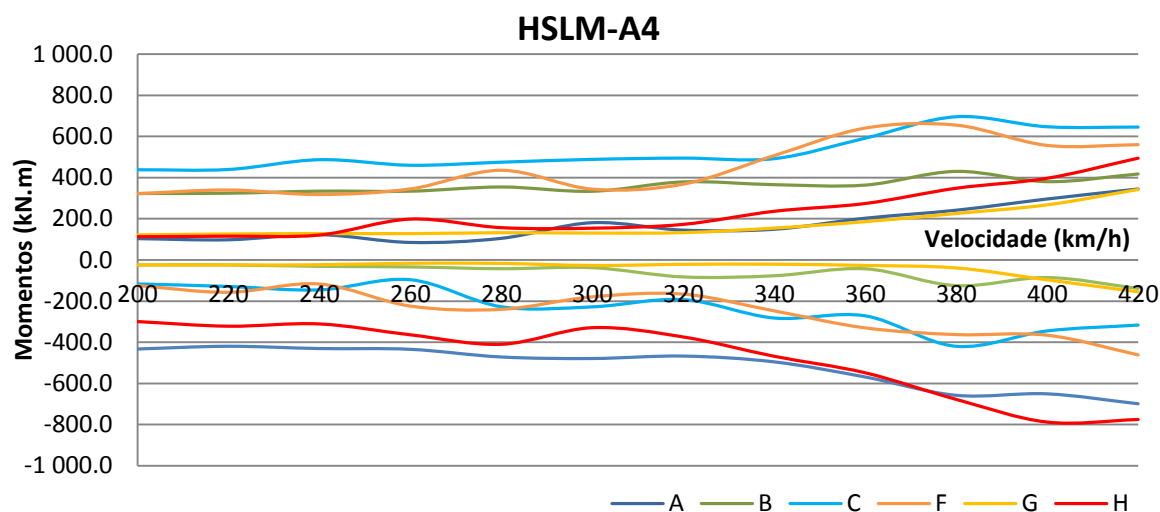
Comboio HSLM-A3								
Momentos negativos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-442,01	-21,83	-141,54	-0,02	-0,04	-127,22	-23,15	-297,81
220	-422,33	-22,63	-144,76	-0,03	-0,04	-154,73	-23,31	-367,33
240	-469,82	-32,38	-132,90	-0,03	-0,03	-157,11	-22,10	-341,49
260	-436,74	-28,85	-127,33	-0,03	-0,03	-277,77	-15,68	-345,73
280	-449,69	-31,01	-268,32	-0,04	-0,06	-312,73	-15,05	-431,56
300	-512,79	-26,32	-264,53	-0,04	-0,06	-257,39	-24,08	-398,08
320	-537,41	-47,85	-198,71	-0,06	-0,05	-164,41	-21,63	-373,20
340	-539,27	-64,38	-216,81	-0,06	-0,07	-208,37	-23,72	-453,38
360	-567,12	-53,21	-252,15	-0,08	-0,10	-287,22	-28,88	-514,07
380	-579,19	-76,74	-322,21	-0,09	-0,11	-336,13	-48,80	-751,07
400	-552,04	-97,26	-385,19	-0,20	-0,15	-379,84	-154,49	-852,73
420	-651,60	-231,41	-314,38	-0,19	-0,15	-512,91	-240,75	-728,01



Anexo A7.3 - Momentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar

Comboio HSLM-A4								
Momentos positivos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	103,66	323,06	438,45	0,03	0,04	322,30	121,92	113,18
220	98,10	324,30	439,76	0,03	0,04	340,05	126,22	115,60
240	122,84	334,51	487,24	0,03	0,04	317,91	128,36	121,04
260	85,10	334,20	460,25	0,03	0,04	345,23	127,89	198,56
280	105,10	354,62	475,11	0,03	0,07	435,80	132,39	156,97
300	181,05	333,84	488,91	0,05	0,05	344,16	130,75	154,38
320	144,95	379,44	495,12	0,05	0,07	368,42	132,79	173,05
340	149,14	365,91	492,40	0,06	0,07	507,28	154,93	236,59
360	202,81	363,92	591,92	0,08	0,09	640,81	185,98	274,35
380	241,73	430,46	696,04	0,10	0,12	655,31	225,87	348,53
400	296,34	380,43	647,43	0,15	0,13	556,80	267,79	397,06
420	344,97	417,86	645,91	0,17	0,14	560,29	342,43	494,68

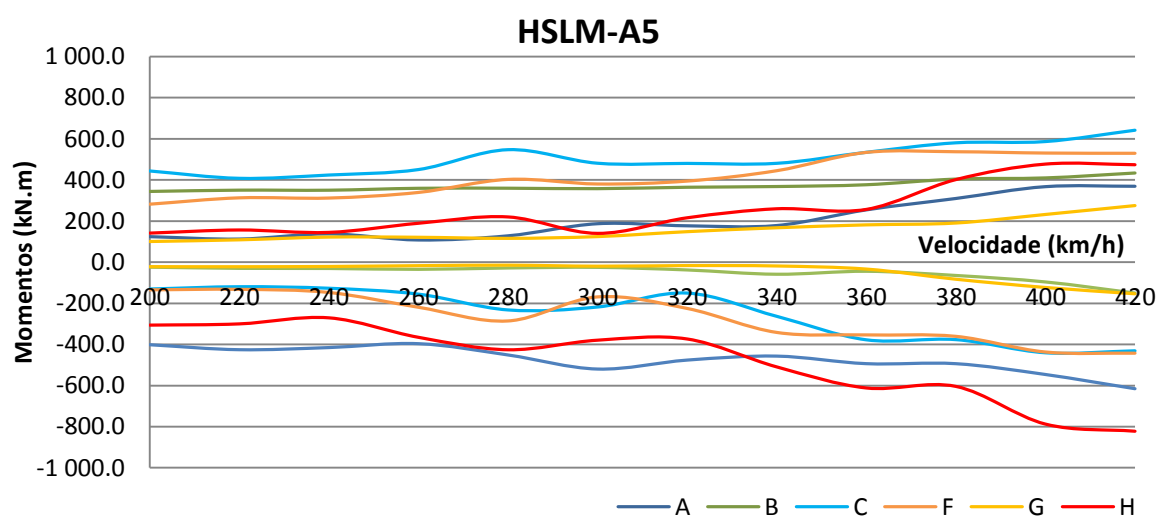
Comboio HSLM-A4								
Momentos negativos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-432,77	-24,51	-116,33	-0,03	-0,04	-124,52	-24,44	-299,43
220	-419,51	-24,23	-128,77	-0,04	-0,04	-157,04	-24,60	-321,94
240	-430,47	-31,10	-145,38	-0,03	-0,04	-116,85	-23,32	-310,91
260	-434,29	-33,92	-96,05	-0,03	-0,05	-224,06	-16,10	-363,69
280	-471,61	-42,63	-227,45	-0,04	-0,04	-240,04	-16,80	-409,87
300	-478,96	-37,50	-227,95	-0,04	-0,05	-179,29	-26,78	-329,16
320	-467,09	-82,48	-192,89	-0,06	-0,06	-166,15	-21,32	-374,19
340	-495,27	-76,82	-282,20	-0,06	-0,09	-247,55	-20,64	-468,05
360	-568,79	-43,00	-271,66	-0,10	-0,08	-330,14	-26,64	-548,37
380	-657,82	-124,84	-419,58	-0,13	-0,11	-362,66	-38,69	-677,46
400	-650,66	-85,55	-344,98	-0,19	-0,15	-365,68	-96,63	-787,98
420	-698,90	-138,24	-316,46	-0,20	-0,19	-461,32	-154,82	-775,42



Anexo A7.4 - Momentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar

Comboio HSLM-A5								
Momentos positivos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	124,15	344,05	443,56	0,02	0,04	282,05	100,50	141,38
220	112,49	350,30	407,82	0,02	0,04	312,89	108,74	156,54
240	137,45	350,01	423,79	0,03	0,04	311,83	122,07	144,88
260	107,98	359,33	450,47	0,02	0,03	339,15	121,19	189,21
280	128,14	359,70	547,12	0,04	0,04	402,54	115,86	220,08
300	187,04	357,60	481,20	0,04	0,05	380,30	124,40	140,05
320	176,97	364,44	480,36	0,04	0,06	394,44	148,37	215,82
340	178,23	367,93	480,86	0,06	0,07	444,87	167,33	259,70
360	254,37	376,57	534,41	0,07	0,08	533,84	181,45	256,67
380	309,83	404,15	580,53	0,09	0,11	537,16	190,49	401,72
400	367,27	409,79	586,64	0,12	0,13	530,72	232,08	477,00
420	369,19	433,65	641,85	0,17	0,15	529,60	275,32	473,87

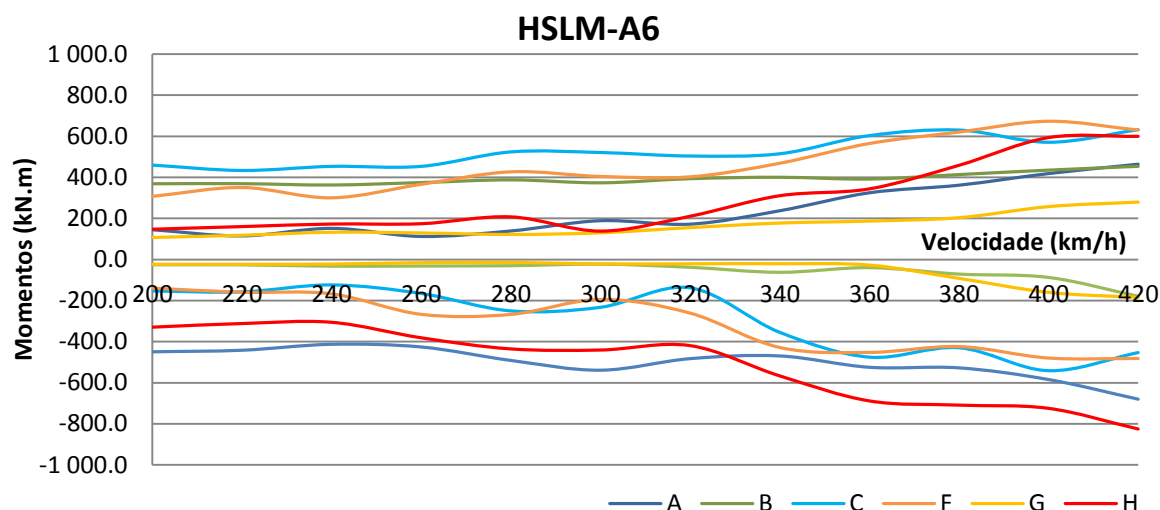
Comboio HSLM-A5								
Momentos negativos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-401,57	-24,25	-130,55	-0,02	-0,04	-134,51	-21,87	-306,13
220	-425,66	-29,93	-119,41	-0,03	-0,04	-132,14	-22,01	-300,17
240	-415,33	-30,58	-126,84	-0,03	-0,03	-147,34	-20,87	-270,70
260	-396,37	-34,74	-155,42	-0,03	-0,04	-219,26	-16,99	-365,34
280	-451,21	-28,23	-232,28	-0,03	-0,05	-285,80	-14,60	-425,94
300	-519,77	-25,22	-218,05	-0,04	-0,05	-168,79	-19,53	-379,33
320	-476,22	-37,78	-150,32	-0,05	-0,06	-225,01	-16,55	-373,51
340	-456,90	-58,70	-263,24	-0,06	-0,06	-341,69	-18,47	-509,27
360	-493,58	-44,31	-377,58	-0,07	-0,08	-353,66	-33,55	-611,82
380	-493,75	-64,69	-376,72	-0,08	-0,11	-360,72	-82,89	-604,08
400	-546,29	-96,18	-440,62	-0,15	-0,15	-436,83	-122,99	-787,48
420	-615,40	-150,14	431,09	-0,19	-0,14	-442,58	-153,74	-822,26



Anexo A7.5 - Momentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar

Comboio HSLM-A6								
Momentos positivos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	29,89	126,62	37,03	14,00	9,07	156,74	22,22	163,45
220	40,54	141,18	35,69	10,84	9,93	169,74	23,51	169,61
240	35,24	137,35	31,33	12,27	10,79	164,79	24,89	161,64
260	32,15	144,21	39,56	15,09	11,29	184,73	36,19	166,83
280	33,14	159,35	50,94	21,20	15,16	213,67	40,10	189,78
300	43,63	130,96	46,11	23,16	16,41	194,00	35,28	193,73
320	36,29	135,51	43,00	28,12	19,75	186,42	39,04	205,94
340	48,03	172,22	39,64	36,62	20,88	242,95	73,39	214,42
360	61,10	160,34	93,23	47,56	29,25	253,78	89,52	240,96
380	69,80	154,61	92,99	54,40	44,94	241,67	81,04	261,04
400	114,03	168,06	135,24	69,38	49,56	283,44	97,50	318,50
420	131,77	150,31	133,98	76,74	67,42	291,65	109,44	355,14

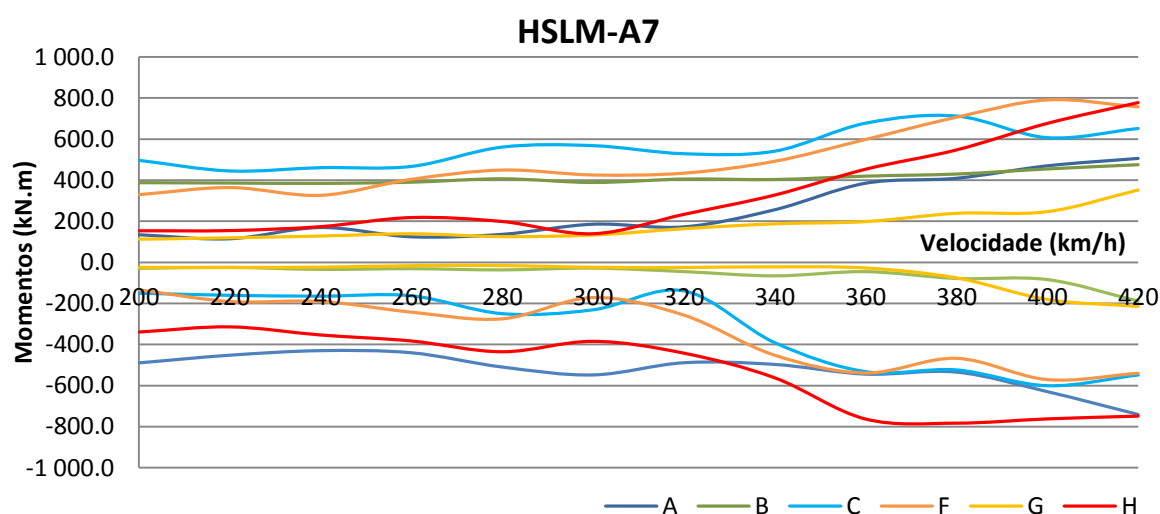
Comboio HSLM-A6								
Momentos negativos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-330.73	-98.79	-328.28	-12.77	-10.75	-31.17	-32.41	-31.59
220	-311.01	-107.89	-337.97	-12.11	-13.94	-44.33	-35.69	-41.01
240	-330.25	-110.82	-331.21	-13.26	-14.19	-34.39	-32.14	-52.61
260	-335.70	-116.37	-315.97	-16.08	-13.24	-82.48	-39.77	-31.64
280	-329.28	-96.04	-323.03	-15.93	-15.62	-62.05	-45.54	-53.85
300	-335.90	-96.01	-345.95	-17.38	-19.04	-22.49	-46.59	-38.51
320	-343.13	-120.87	-346.93	-18.66	-16.75	-69.41	-47.33	-53.76
340	-343.55	-126.52	-339.78	-20.79	-22.01	-100.12	-60.69	-83.31
360	-360.77	-132.14	-312.81	-26.05	-30.13	-117.26	-74.03	-81.29
380	-359.59	-129.87	-338.49	-35.53	-39.41	-132.23	-83.02	-128.47
400	-320.22	-104.09	-352.70	-53.42	-49.87	-189.04	-102.75	-208.09
420	-389.09	-141.67	-395.93	-72.39	-61.43	-196.50	-92.46	-213.68



Anexo A7.6 - Momentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar

Comboio HSLM-A7								
Momentos positivos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	134,32	387,79	496,47	0,02	0,04	329,52	112,62	153,74
220	114,93	386,15	444,86	0,03	0,03	364,23	119,57	154,67
240	169,56	384,40	460,86	0,02	0,04	326,29	128,13	173,88
260	124,32	390,22	467,05	0,03	0,03	404,27	139,05	218,11
280	136,48	406,74	561,09	0,03	0,05	449,32	125,34	198,72
300	185,80	388,84	568,05	0,05	0,06	425,37	133,01	139,31
320	172,80	405,63	528,77	0,06	0,05	434,22	163,98	233,71
340	256,21	403,30	541,36	0,07	0,07	492,11	187,65	327,73
360	385,22	419,63	677,45	0,07	0,09	598,19	198,43	453,41
380	409,36	429,89	712,24	0,11	0,12	706,47	238,73	547,22
400	469,90	454,66	606,97	0,15	0,15	790,78	246,86	676,54
420	505,91	475,30	651,59	0,21	0,13	757,13	351,97	777,69

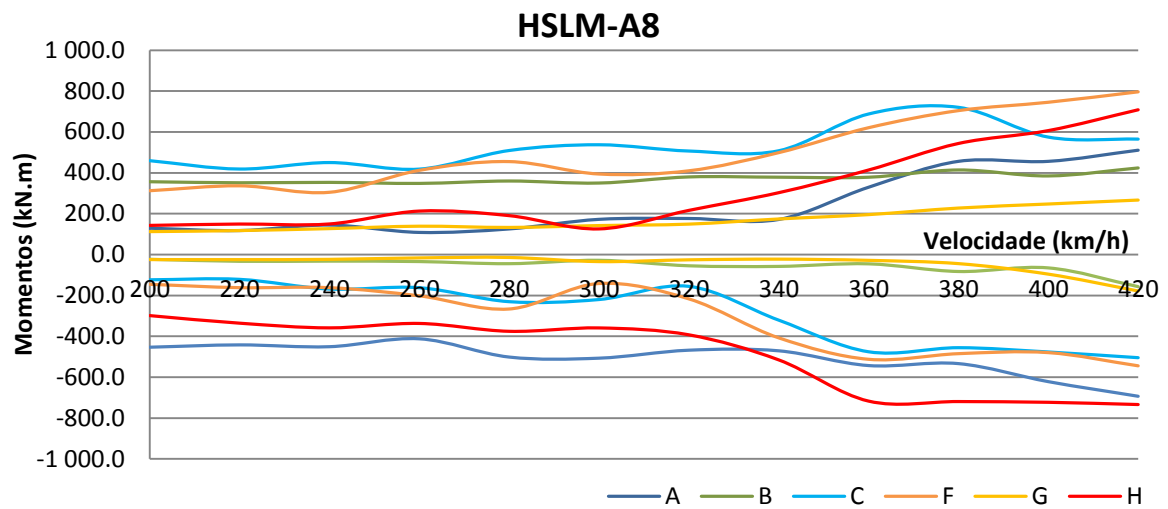
Comboio HSLM-A7								
Momentos negativos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-489,36	-28,99	-150,00	-0,02	-0,04	-133,63	-24,44	-339,11
220	-452,00	-24,66	-160,40	-0,03	-0,04	-190,53	-24,60	-313,99
240	-429,78	-34,18	-164,55	-0,03	-0,03	-190,12	-23,32	-353,46
260	-440,14	-30,91	-162,73	-0,04	-0,04	-242,45	-16,10	-382,77
280	-509,60	-36,67	-249,75	-0,04	-0,05	-274,94	-15,49	-435,23
300	-547,87	-27,91	-230,97	-0,04	-0,07	-171,39	-23,97	-384,37
320	-488,53	-44,95	-139,05	-0,07	-0,05	-257,00	-24,77	-442,01
340	-496,86	-65,65	-391,01	-0,08	-0,08	-452,24	-21,76	-562,04
360	-544,03	-45,28	-532,04	-0,07	-0,08	-538,45	-27,44	-762,70
380	-534,30	-78,50	-523,54	-0,10	-0,11	-466,95	-75,55	-782,70
400	-629,28	-83,86	-600,42	-0,17	-0,14	-570,83	-180,70	-761,92
420	-740,41	-188,50	-548,11	-0,21	-0,17	-539,66	-213,96	-748,35



Anexo A7.7 - Momentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar

Comboio HSLM-A8								
Momentos positivos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	129,12	356,55	459,48	0,02	0,03	312,55	112,42	142,82
220	117,64	351,48	418,69	0,02	0,03	336,62	117,53	149,51
240	144,53	353,45	450,44	0,03	0,04	304,89	127,10	149,91
260	108,59	348,37	418,28	0,03	0,03	412,27	138,93	212,98
280	125,55	360,05	509,23	0,03	0,06	455,08	132,99	190,64
300	172,51	350,10	537,49	0,05	0,05	394,24	142,01	125,61
320	176,63	379,99	506,74	0,05	0,08	410,05	149,11	216,34
340	171,83	378,67	508,09	0,07	0,09	498,83	174,38	302,94
360	329,57	378,61	687,92	0,08	0,09	620,81	195,54	413,83
380	456,30	414,14	720,54	0,10	0,10	704,52	227,66	543,71
400	456,29	384,86	574,98	0,13	0,12	745,39	247,55	606,73
420	510,86	424,09	565,16	0,20	0,14	796,40	266,93	708,59

Comboio HSLM-A8								
Momentos negativos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-453,15	-22,96	-123,35	-0,02	-0,03	-145,32	-24,44	-298,50
220	-441,78	-32,78	-121,05	-0,03	-0,03	-161,82	-24,60	-335,53
240	-450,64	-31,95	-168,61	-0,03	-0,04	-161,87	-23,32	-358,48
260	-412,00	-33,95	-162,13	-0,03	-0,04	-201,69	-16,10	-336,86
280	-501,30	-44,51	-230,31	-0,04	-0,04	-266,21	-14,03	-375,33
300	-506,75	-27,86	-219,95	-0,04	-0,05	-141,42	-34,30	-358,74
320	-467,81	-54,72	-155,47	-0,05	-0,06	-216,69	-25,50	-392,49
340	-470,76	-57,74	-320,63	-0,06	-0,07	-407,34	-22,28	-515,12
360	-542,90	-45,23	-475,52	-0,08	-0,10	-512,23	-28,13	-716,81
380	-533,42	-82,74	-455,55	-0,10	-0,10	-484,79	-44,19	-718,99
400	-621,62	-65,02	-476,57	-0,16	-0,12	-479,68	-95,65	-722,71
420	-693,17	-156,82	-504,44	-0,17	-0,13	-544,24	-178,13	-733,69



Anexo A7.8 - Momentos máximos positivos e negativos para cada uma das secções a analisar

Comboio HSLM-A9								
Momentos positivos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	157,33	429,27	570,15	0,02	0,04	355,55	126,27	159,16
220	127,40	428,22	500,51	0,03	0,03	393,21	135,38	162,24
240	172,07	435,42	523,29	0,03	0,04	346,91	134,08	161,72
260	141,35	427,92	493,93	0,03	0,04	422,77	155,52	216,54
280	162,77	447,89	587,04	0,05	0,04	496,63	147,28	219,47
300	195,24	441,39	597,89	0,05	0,05	471,15	176,00	167,67
320	206,05	440,46	579,55	0,06	0,06	497,95	181,23	222,50
340	190,44	463,36	581,37	0,07	0,07	602,15	207,43	342,96
360	321,56	441,46	745,72	0,07	0,10	650,34	219,78	418,19
380	410,49	468,97	817,96	0,11	0,12	789,70	250,74	585,60
400	500,36	499,18	655,30	0,15	0,17	882,39	278,23	699,49
420	547,97	523,39	636,74	0,23	0,17	913,24	328,48	819,57

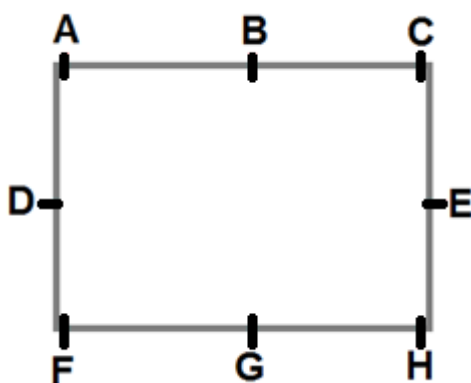
Comboio HSLM-A9								
Momentos negativos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-516,90	-27,07	-169,98	-0,02	-0,04	-143,13	-27,01	-324,80
220	-476,67	-29,34	-142,55	-0,03	-0,05	-196,25	-27,19	-402,74
240	-511,51	-37,78	-173,66	-0,02	-0,04	-166,43	-25,78	-400,58
260	-495,77	-36,08	-192,92	-0,03	-0,04	-206,27	-17,80	-357,38
280	-564,87	-50,73	-215,47	-0,03	-0,05	-270,73	-19,97	-418,87
300	-572,25	-50,17	-199,31	-0,04	-0,07	-176,16	-37,17	-459,35
320	-529,44	-48,95	-196,53	-0,06	-0,05	-240,55	-31,28	-435,10
340	-541,83	-72,56	-374,71	-0,08	-0,07	-488,10	-48,46	-569,86
360	-605,62	-44,03	-543,88	-0,08	-0,08	-590,30	-51,59	-757,52
380	-597,70	-103,68	-587,82	-0,12	-0,13	-562,61	-111,23	-907,00
400	-732,68	-120,74	-581,68	-0,19	-0,16	-670,80	-169,43	-837,02
420	-760,22	-165,01	-715,68	-0,21	-0,17	-790,53	-211,42	-907,87

Comboio HSLM-A10								
Momentos positivos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	137,91	428,69	523,29	0,03	0,04	318,82	123,32	144,22
220	112,81	420,12	502,56	0,03	0,04	391,48	132,61	162,24
240	158,46	436,74	524,47	0,02	0,04	337,45	136,42	148,35
260	118,80	430,26	495,18	0,04	0,04	403,08	151,65	221,08
280	162,77	437,25	564,31	0,04	0,05	494,36	155,95	185,27
300	203,37	438,60	603,21	0,05	0,06	469,39	168,73	217,20
320	190,42	435,99	578,72	0,06	0,05	495,09	181,23	227,09
340	186,52	445,54	538,66	0,07	0,08	577,12	207,43	298,76
360	272,14	454,17	762,89	0,08	0,10	649,17	246,14	359,28
380	342,30	460,60	799,06	0,12	0,12	665,72	253,29	515,06
400	484,92	487,28	637,84	0,16	0,16	883,70	295,22	672,48
420	581,65	522,06	667,89	0,22	0,20	907,42	329,73	839,58

Comboio HSLM-A10								
Momentos negativos (kN.m)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-492,44	-28,50	-152,46	-0,02	-0,03	-146,48	-27,01	-329,22
220	-478,70	-32,03	-154,85	-0,03	-0,05	-189,05	-27,19	-403,35
240	-528,89	-39,95	-190,99	-0,02	-0,05	-170,57	-25,78	-378,39
260	-493,15	-37,56	-158,69	-0,03	-0,04	-244,99	-17,80	-343,34
280	-554,63	-42,50	-181,38	-0,04	-0,07	-296,11	-11,04	-424,97
300	-566,48	-50,36	-251,47	-0,05	-0,05	-221,03	-26,77	-440,60
320	-534,15	-46,19	-165,91	-0,07	-0,06	-239,43	-34,98	-429,33
340	-544,27	-72,56	-342,31	-0,07	-0,07	-459,43	-43,42	-523,51
360	-607,81	-44,23	-512,40	-0,09	-0,09	-554,95	-59,43	-694,92
380	-611,03	-94,41	-526,31	-0,10	-0,13	-524,81	-111,94	-790,83
400	-732,04	-107,63	-533,70	-0,21	-0,17	-621,00	-194,45	-831,21
420	-792,70	-195,07	-657,02	-0,21	-0,18	-791,00	-231,33	-896,66

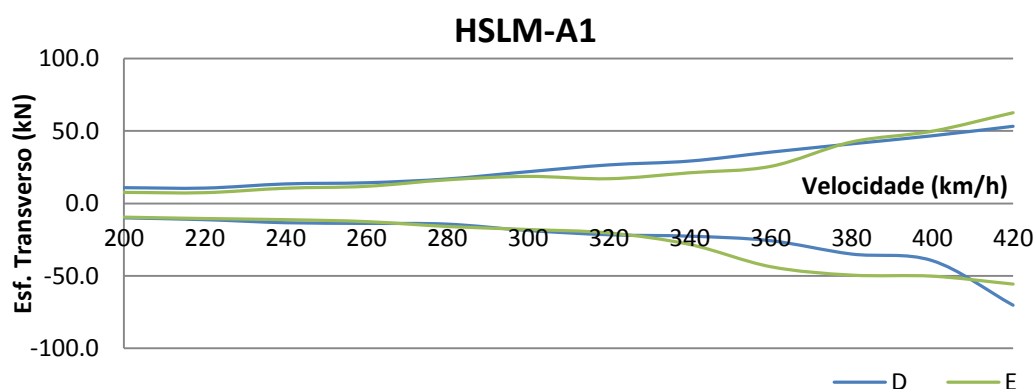
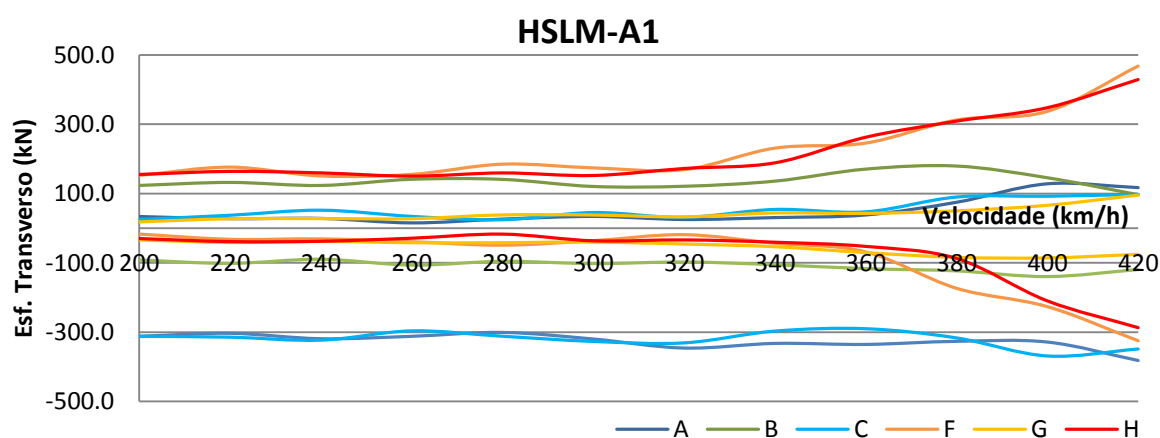
Anexo A8

ESFORÇOS TRANSVERSOS NAS SECÇÕES (A; B; C; D; E; F; G; H)



Comboio HSLM-A1								
Esforço transverso positivo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	33,70	123,37	25,29	10,85	7,61	152,28	18,17	154,99
220	27,45	132,08	37,31	10,57	7,39	176,15	27,30	163,90
240	28,23	123,26	51,91	13,43	10,47	150,72	27,68	159,53
260	15,34	141,07	34,06	14,23	11,78	155,21	27,47	150,10
280	26,22	140,83	24,33	16,86	16,26	184,71	38,29	159,48
300	33,93	120,35	45,19	21,87	18,63	173,98	38,02	151,99
320	25,09	120,96	31,19	26,56	17,02	169,01	32,83	172,27
340	30,61	135,76	54,07	29,20	21,13	230,99	43,95	188,53
360	38,15	170,50	47,19	35,34	25,52	245,51	42,68	262,36
380	74,81	179,30	89,86	41,04	42,35	312,12	50,04	308,85
400	128,03	145,57	92,21	46,65	49,77	337,01	66,01	347,65
420	117,06	96,68	97,48	53,17	62,55	467,82	95,44	428,89

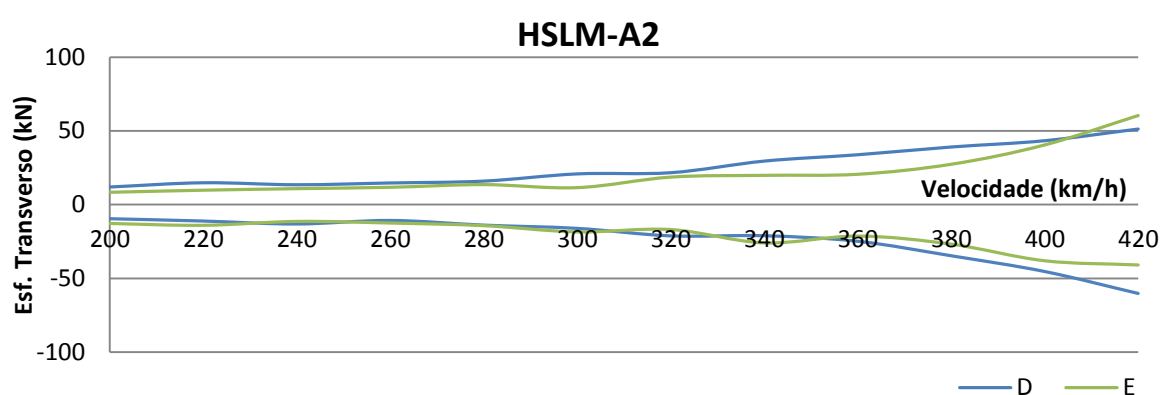
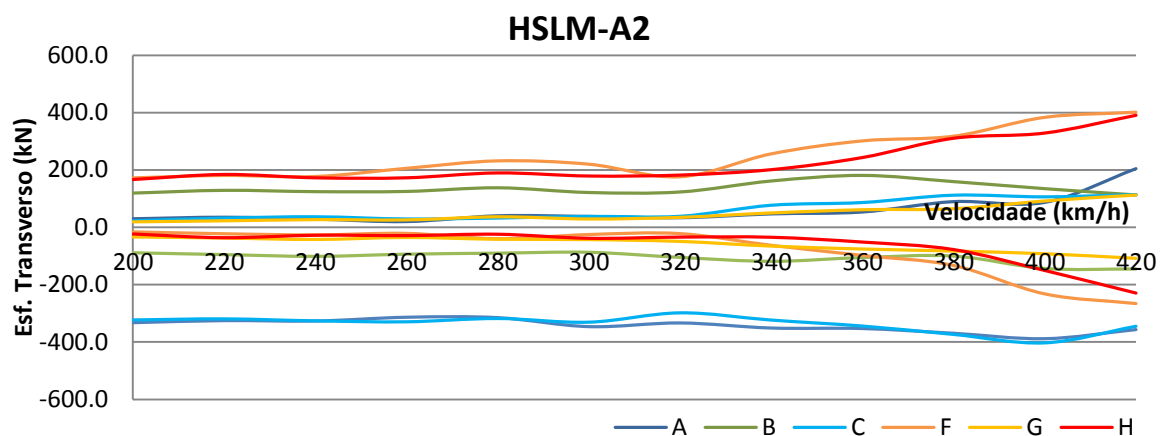
Comboio HSLM-A1								
Esforço transverso negativo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-311,91	-91,59	-311,95	-9,99	-9,49	-17,01	-33,70	-29,83
220	-303,29	-101,54	-314,43	-11,22	-10,43	-32,03	-41,20	-38,73
240	-318,86	-89,46	-323,05	-13,34	-11,22	-30,80	-37,94	-37,73
260	-311,93	-106,44	-296,27	-13,79	-12,56	-39,16	-41,94	-28,87
280	-300,73	-95,50	-311,74	-14,30	-15,92	-49,06	-41,74	-17,09
300	-319,70	-102,24	-326,71	-18,68	-18,01	-36,04	-39,98	-36,37
320	-345,82	-97,48	-330,88	-21,64	-20,39	-18,72	-45,68	-33,76
340	-332,41	-105,37	-296,88	-22,61	-28,33	-43,51	-53,43	-40,46
360	-335,37	-116,66	-290,03	-25,74	-43,66	-68,39	-70,46	-52,53
380	-326,40	-123,15	-316,46	-34,92	-49,46	-173,41	-84,20	-87,20
400	-328,49	-139,52	-368,65	-39,48	-50,19	-226,31	-85,71	-209,72
420	-381,64	-119,49	-348,50	-70,22	-55,66	-324,76	-75,53	-286,96



Anexo A8.1 - Esforço transverso máximo positivo e negativo para cada uma das secções a analisar a) Esf. transversal vertical b) Esf. transversal horizontal

Comboio HSLM-A2								
Esforço transverso positivo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	29,79	119,35	22,68	11,97	8,39	172,45	19,09	166,68
220	35,19	128,93	32,21	14,85	9,79	180,82	22,68	184,34
240	28,75	124,40	36,69	13,49	10,85	177,18	26,77	172,64
260	20,03	125,14	29,11	14,71	11,77	205,74	25,88	172,65
280	40,13	137,83	32,36	15,97	13,59	231,70	36,68	189,70
300	37,97	121,40	38,05	20,86	11,54	220,13	29,05	178,88
320	33,45	123,23	38,51	21,66	18,69	176,15	34,66	182,19
340	46,77	161,58	76,94	29,54	19,88	256,19	50,17	201,04
360	53,45	181,02	86,44	33,85	20,60	301,45	61,29	243,35
380	89,59	159,36	112,00	39,10	27,39	317,81	64,71	310,59
400	86,97	134,79	106,23	43,38	40,52	383,52	92,00	328,77
420	204,55	112,80	114,17	51,30	60,45	401,42	112,55	390,59

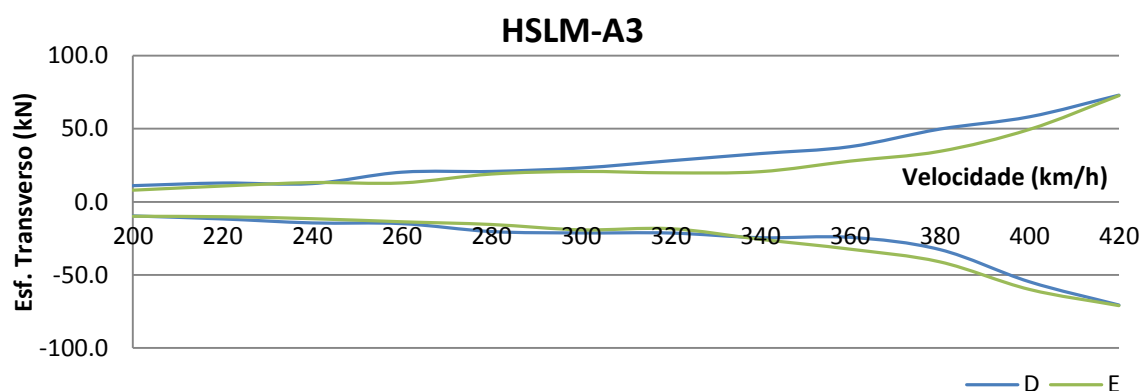
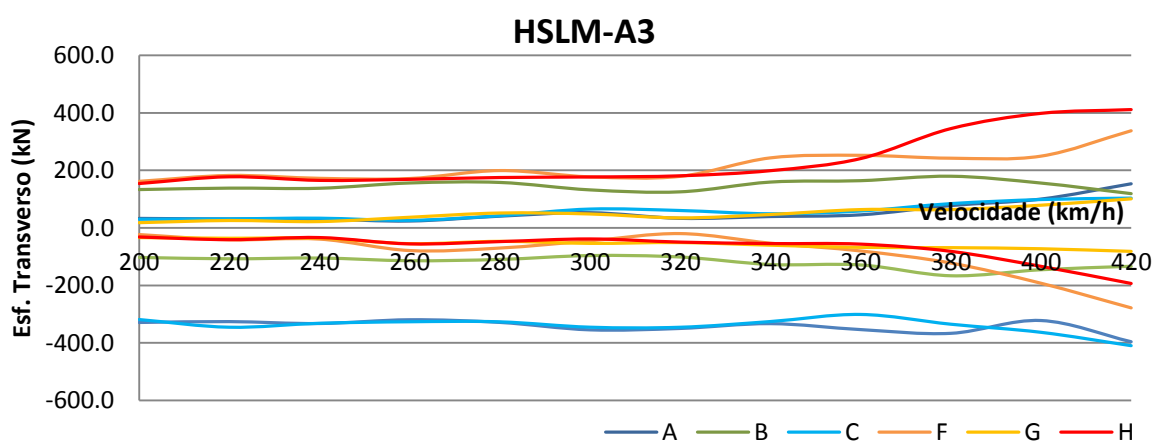
Comboio HSLM-A2								
Esforço transverso negativo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-332,62	-88,75	-323,06	-9,55	-12,79	-15,94	-33,52	-23,29
220	-325,32	-95,22	-319,28	-11,13	-14,03	-22,46	-37,41	-36,23
240	-326,79	-101,29	-326,19	-13,14	-11,37	-26,35	-42,31	-27,62
260	-313,63	-93,74	-329,55	-10,73	-12,49	-21,17	-35,49	-28,96
280	-314,99	-90,14	-317,99	-13,89	-14,25	-39,70	-41,59	-24,15
300	-346,38	-87,17	-330,87	-16,10	-18,51	-25,15	-42,82	-38,32
320	-333,55	-104,97	-298,29	-21,19	-16,89	-22,02	-49,10	-34,14
340	-351,26	-118,62	-323,53	-21,10	-25,93	-62,79	-65,48	-34,75
360	-353,03	-105,44	-344,38	-24,86	-21,34	-97,98	-75,70	-51,48
380	-369,57	-100,24	-373,58	-34,68	-26,79	-133,16	-82,82	-77,57
400	-388,43	-143,58	-402,92	-45,38	-38,08	-232,26	-92,18	-150,60
420	-356,60	-145,32	-345,07	-60,24	-40,94	-265,88	-108,12	-229,35



Anexo A8.2 - Esforço transverso máximo positivo e negativo para cada uma das secções a analisar a) Esf. transverso vertical b) Esf. transverso horizontal

Comboio HSLM-A3								
Esforço transverso positivo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	33,03	133,30	29,97	11,06	7,94	161,93	18,14	154,32
220	30,96	138,30	31,37	12,85	10,80	182,39	25,67	177,78
240	30,45	137,85	33,74	12,47	13,17	172,43	21,99	165,23
260	23,88	156,25	26,34	20,27	12,94	171,69	37,01	168,96
280	40,81	158,09	42,32	20,79	19,00	199,34	51,76	175,27
300	52,88	132,22	65,50	23,16	20,78	177,45	48,35	177,09
320	33,20	125,39	60,48	28,12	19,82	179,29	34,80	181,21
340	39,48	159,38	49,10	33,03	20,62	243,55	46,66	198,97
360	45,47	164,25	58,81	37,73	27,86	252,43	63,71	241,03
380	77,65	179,72	84,39	49,75	34,53	242,48	63,63	345,35
400	100,27	156,00	98,59	58,17	49,53	249,63	78,92	398,43
420	153,44	119,13	103,57	73,02	72,73	337,97	101,05	411,53

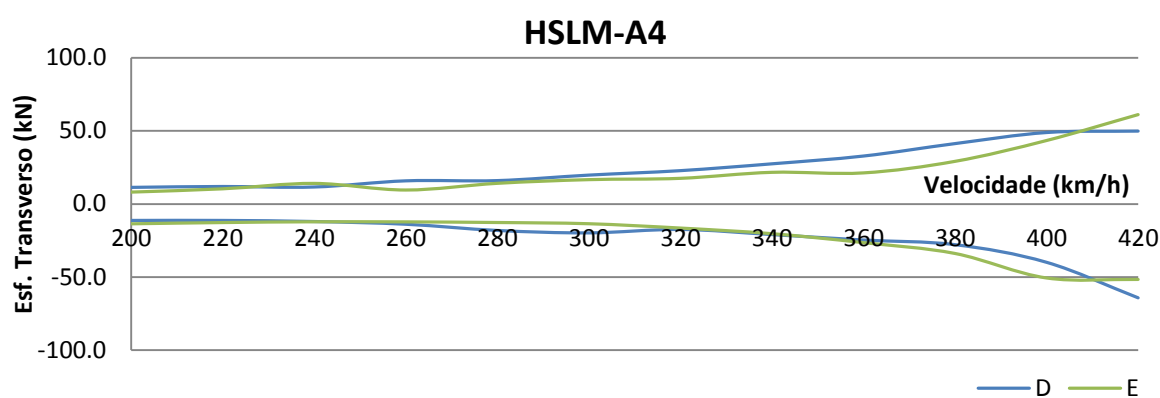
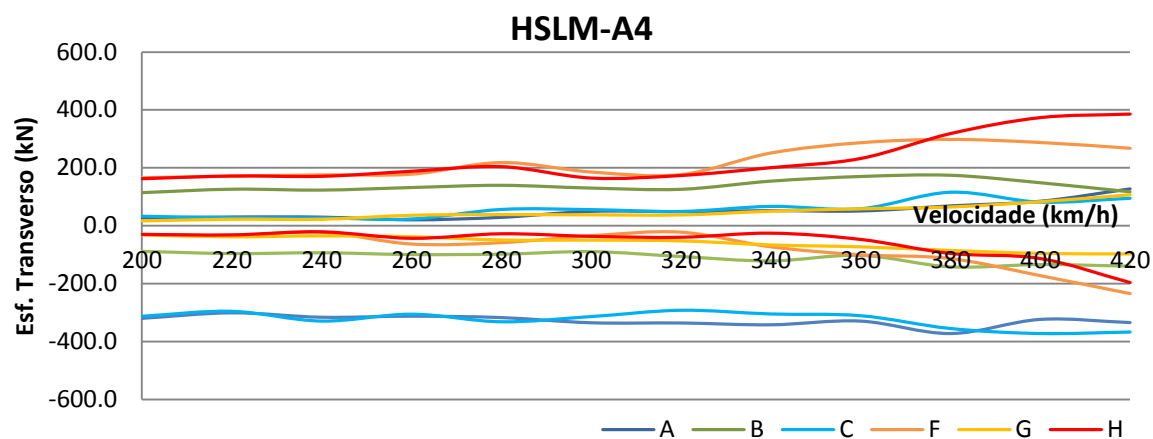
Comboio HSLM-A3								
Esforço transverso negativo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-329,01	-102,82	-318,84	-9,66	-9,92	-23,21	-33,71	-31,59
220	-326,02	-107,49	-345,57	-11,74	-10,22	-41,34	-35,99	-41,01
240	-332,65	-104,94	-331,93	-14,46	-11,57	-39,00	-35,89	-33,63
260	-319,53	-114,16	-326,49	-14,95	-13,68	-78,82	-54,91	-55,65
280	-328,82	-109,78	-326,81	-20,38	-15,53	-70,13	-46,86	-47,67
300	-354,71	-96,27	-345,44	-21,33	-19,21	-45,00	-53,89	-38,51
320	-349,81	-101,30	-345,68	-21,38	-18,42	-19,82	-51,06	-49,47
340	-333,15	-127,33	-325,77	-24,58	-25,70	-53,26	-60,17	-54,50
360	-353,86	-128,96	-301,10	-24,35	-32,43	-80,24	-67,83	-56,52
380	-366,77	-166,52	-335,08	-32,67	-41,09	-122,20	-68,74	-81,53
400	-322,24	-145,56	-363,30	-54,74	-59,97	-192,52	-72,58	-133,76
420	-396,08	-133,54	-409,80	-70,68	-71,10	-278,29	-81,75	-193,40



Anexo A8.3 - Esforço transverso máximo positivo e negativo para cada uma das secções a analisar a) Esf. transversal b) Esf. transversal horizontal

Comboio HSLM-A4								
Esforço transverso positivo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	26,61	114,25	32,73	11,37	8,13	165,78	16,61	162,39
220	30,01	126,18	27,55	11,97	10,38	171,07	22,41	171,77
240	29,59	123,07	26,87	11,61	14,09	175,73	22,34	170,71
260	20,38	131,92	23,22	15,84	9,56	178,09	35,95	188,14
280	28,90	139,61	56,27	16,01	14,15	218,24	38,53	204,14
300	49,60	130,09	55,60	19,77	16,67	185,58	37,50	164,64
320	48,70	125,83	49,11	22,82	17,57	176,63	37,20	173,53
340	52,07	153,97	66,83	27,49	21,68	251,17	50,17	200,53
360	50,98	170,04	58,61	32,83	21,28	286,75	58,39	232,31
380	68,46	174,34	115,71	41,34	29,19	298,28	64,65	318,30
400	84,51	148,47	81,60	48,92	43,45	287,61	83,02	373,47
420	127,27	117,14	94,73	49,90	61,20	267,64	106,80	385,71

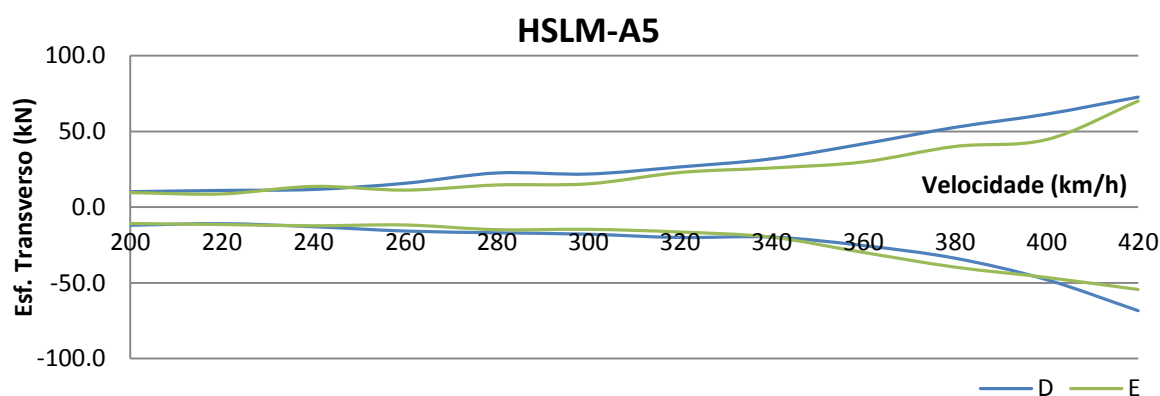
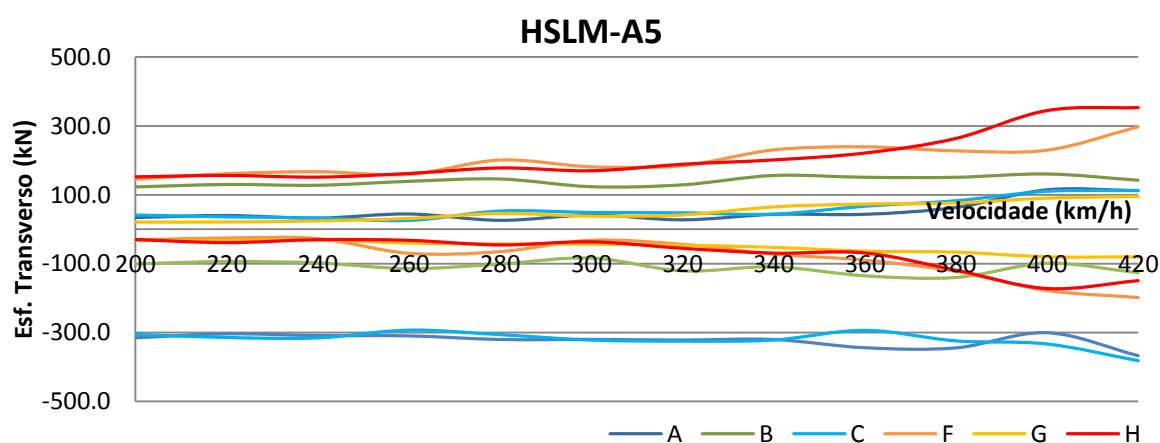
Comboio HSLM-A4								
Esforço transverso negativo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-319,91	-88,58	-312,68	-11,26	-13,58	-29,46	-31,79	-30,17
220	-301,06	-96,21	-295,73	-11,27	-12,72	-33,49	-38,29	-31,75
240	-316,29	-93,51	-329,54	-12,01	-12,19	-22,46	-35,05	-21,07
260	-312,59	-99,60	-305,74	-13,88	-12,25	-63,31	-38,11	-43,54
280	-317,41	-98,29	-331,92	-18,13	-12,68	-58,51	-49,29	-27,81
300	-335,35	-89,55	-313,90	-19,79	-13,54	-34,59	-49,85	-36,77
320	-336,09	-106,42	-292,15	-17,43	-16,49	-22,29	-52,44	-39,91
340	-342,31	-121,60	-304,95	-20,96	-20,34	-72,99	-66,41	-25,75
360	-329,60	-102,41	-310,94	-24,68	-26,47	-100,45	-73,03	-47,40
380	-372,50	-142,14	-355,18	-27,86	-33,90	-113,46	-85,38	-95,68
400	-323,76	-134,13	-372,52	-39,94	-50,65	-172,59	-95,65	-113,45
420	-334,56	-139,73	-367,29	-64,25	-51,67	-234,63	-97,46	-196,39



Anexo A8.4 - Esforço transverso máximo positivo e negativo para cada uma das secções a analisar a) Esf. transverso vertical b) Esf. transverso horizontal

Comboio HSLM-A5								
Esforço transverso positivo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	34,03	123,00	41,32	10,19	9,60	145,54	20,87	152,21
220	39,92	129,97	35,96	11,03	8,73	161,18	21,09	156,23
240	32,36	127,71	32,65	11,69	13,68	167,10	24,08	151,34
260	44,36	139,13	25,71	15,76	11,24	159,51	31,39	162,02
280	25,91	145,94	52,86	22,55	14,62	201,01	45,80	177,98
300	41,32	123,55	48,81	21,87	15,39	181,34	37,98	169,79
320	27,37	128,95	47,63	26,55	22,89	184,80	41,49	188,64
340	43,28	156,10	43,80	31,91	25,87	230,36	64,90	201,26
360	43,43	150,84	66,90	41,78	29,84	239,34	73,21	221,23
380	63,38	150,86	82,74	52,68	40,08	227,59	76,29	263,60
400	114,48	160,47	110,26	61,43	44,61	229,71	90,26	344,59
420	112,25	142,36	112,38	72,67	70,09	297,27	95,44	353,31

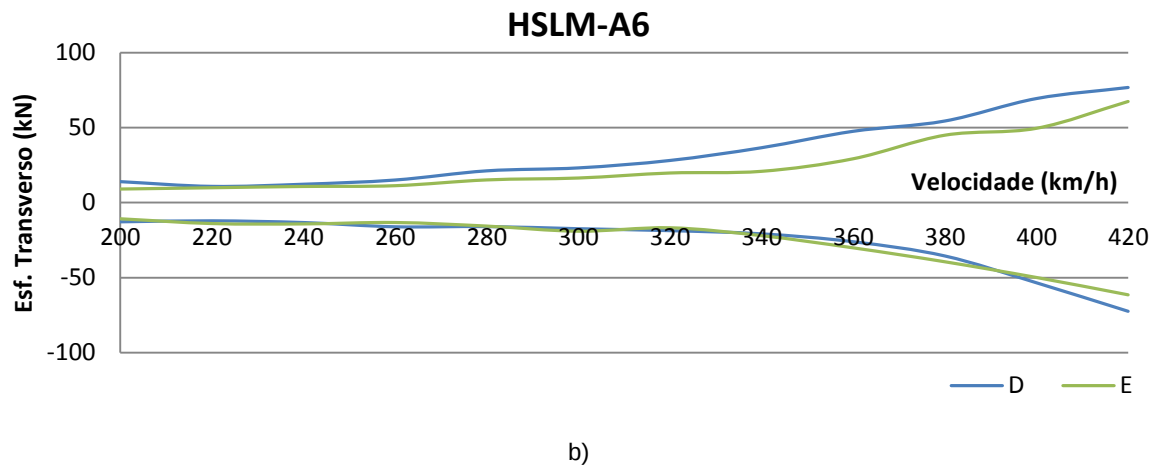
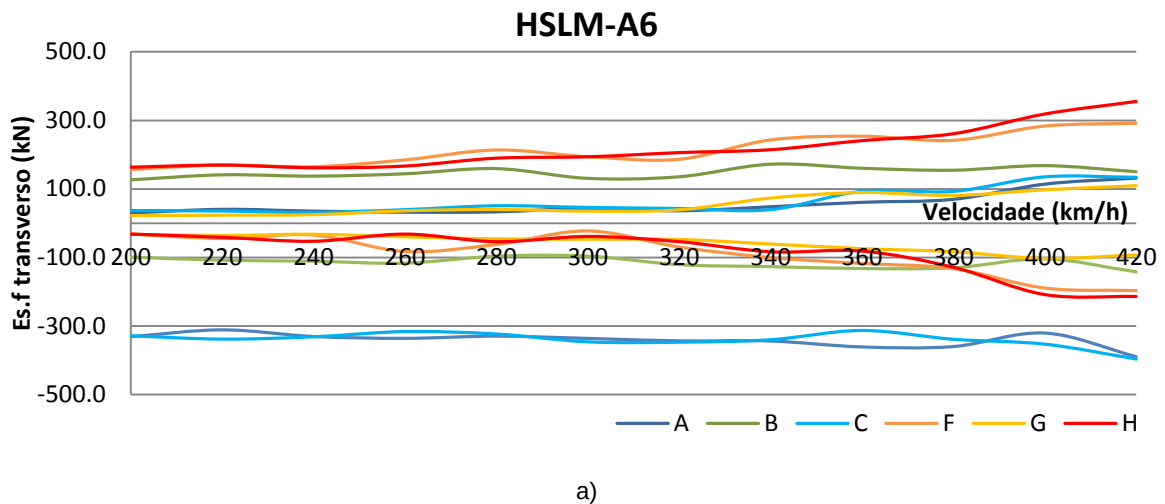
Comboio HSLM-A5								
Esforço transverso negativo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-315,12	-100,42	-305,15	-11,96	-10,80	-30,94	-31,56	-29,83
220	-303,62	-93,73	-314,21	-10,93	-11,49	-25,26	-33,14	-38,73
240	-308,65	-97,78	-315,31	-12,93	-12,31	-27,13	-30,70	-30,24
260	-309,44	-114,23	-292,85	-15,80	-11,79	-69,74	-40,06	-32,16
280	-319,97	-101,09	-305,99	-16,95	-14,91	-64,98	-42,79	-45,54
300	-319,77	-83,55	-321,66	-17,90	-14,65	-31,85	-42,89	-36,37
320	-321,59	-120,79	-324,88	-20,07	-16,43	-43,70	-46,24	-55,24
340	-320,10	-109,12	-321,55	-19,78	-19,85	-71,93	-52,57	-69,28
360	-343,89	-135,04	-293,43	-25,37	-29,92	-89,77	-63,48	-68,79
380	-344,36	-139,92	-324,00	-33,72	-39,61	-122,12	-66,40	-118,69
400	-300,36	-98,87	-333,11	-47,90	-46,45	-177,47	-79,96	-172,01
420	-366,98	-126,22	-381,44	-68,40	-54,41	-198,17	-80,30	-149,18



Anexo A8.5 - Esforço transverso máximo positivo e negativo para cada uma das secções a analisar a) Esf. transversal vertical b) Esf. transversal horizontal

Comboio HSLM-A6								
Esforço transverso positivo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	29,89	126,62	37,03	14,00	9,07	156,74	22,22	163,45
220	40,54	141,18	35,69	10,84	9,93	169,74	23,51	169,61
240	35,24	137,35	31,33	12,27	10,79	164,79	24,89	161,64
260	32,15	144,21	39,56	15,09	11,29	184,73	36,19	166,83
280	33,14	159,35	50,94	21,20	15,16	213,67	40,10	189,78
300	43,63	130,96	46,11	23,16	16,41	194,00	35,28	193,73
320	36,29	135,51	43,00	28,12	19,75	186,42	39,04	205,94
340	48,03	172,22	39,64	36,62	20,88	242,95	73,39	214,42
360	61,10	160,34	93,23	47,56	29,25	253,78	89,52	240,96
380	69,80	154,61	92,99	54,40	44,94	241,67	81,04	261,04
400	114,03	168,06	135,24	69,38	49,56	283,44	97,50	318,50
420	131,77	150,31	133,98	76,74	67,42	291,65	109,44	355,14

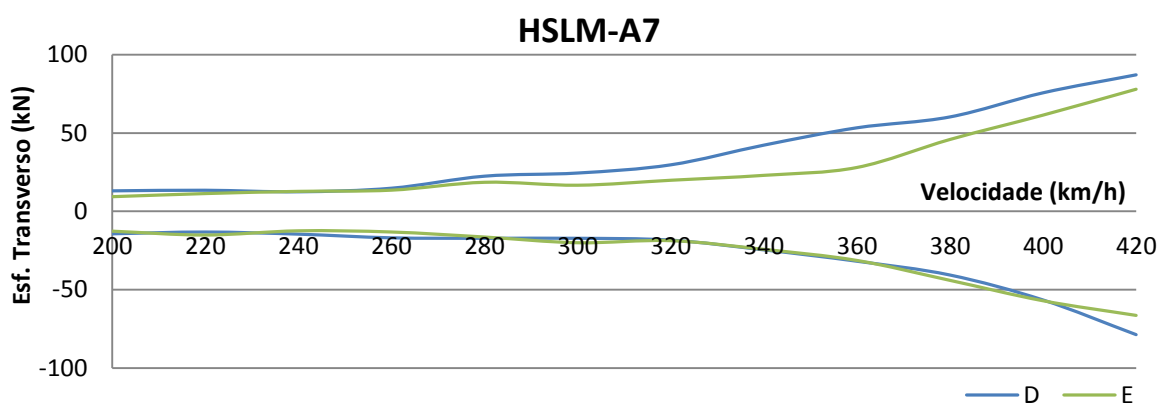
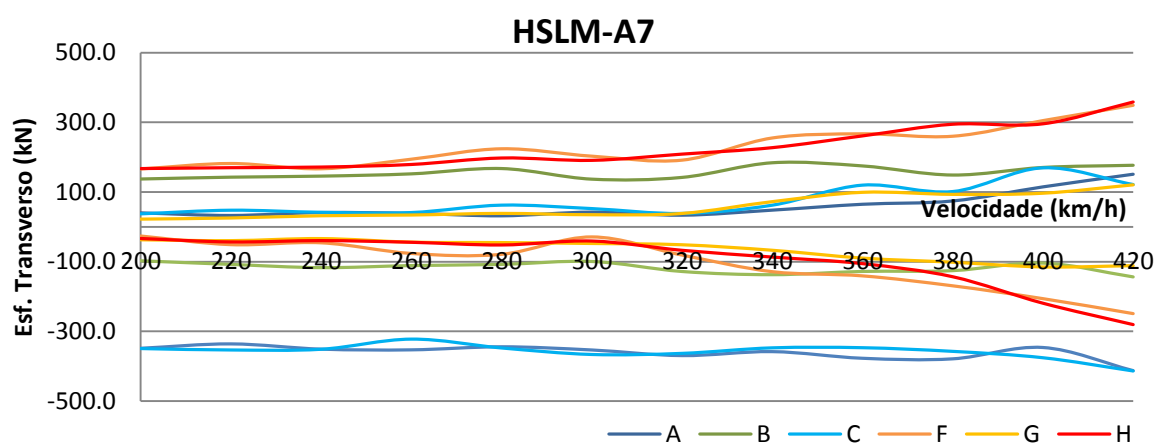
Comboio HSLM-A6								
Esforço transverso negativo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-330,73	-98,79	-328,28	-12,77	-10,75	-31,17	-32,41	-31,59
220	-311,01	-107,89	-337,97	-12,11	-13,94	-44,33	-35,69	-41,01
240	-330,25	-110,82	-331,21	-13,26	-14,19	-34,39	-32,14	-52,61
260	-335,70	-116,37	-315,97	-16,08	-13,24	-82,48	-39,77	-31,64
280	-329,28	-96,04	-323,03	-15,93	-15,62	-62,05	-45,54	-53,85
300	-335,90	-96,01	-345,95	-17,38	-19,04	-22,49	-46,59	-38,51
320	-343,13	-120,87	-346,93	-18,66	-16,75	-69,41	-47,33	-53,76
340	-343,55	-126,52	-339,78	-20,79	-22,01	-100,12	-60,69	-83,31
360	-360,77	-132,14	-312,81	-26,05	-30,13	-117,26	-74,03	-81,29
380	-359,59	-129,87	-338,49	-35,53	-39,41	-132,23	-83,02	-128,47
400	-320,22	-104,09	-352,70	-53,42	-49,87	-189,04	-102,75	-208,09
420	-389,09	-141,67	-395,93	-72,39	-61,43	-196,50	-92,46	-213,68



Anexo A8.6 - Esforço transverso máximo positivo e negativo para cada uma das secções a analisar a) Esf. transverso vertical b) Esf. transverso horizontal

Comboio HSLM-A7								
Esforço transverso positivo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	40,20	137,45	37,38	13,08	9,34	166,41	22,22	167,38
220	32,77	142,70	47,84	13,46	11,33	181,96	25,54	169,89
240	41,16	145,69	41,83	12,49	12,75	166,82	31,94	171,77
260	38,79	152,23	41,16	14,76	13,51	194,37	34,07	179,21
280	31,77	167,50	62,40	22,45	18,54	224,24	38,71	197,71
300	42,36	137,01	52,46	24,44	16,67	203,01	34,82	191,01
320	33,51	142,06	38,57	29,68	19,83	191,60	38,56	208,91
340	48,04	184,07	62,28	42,25	22,96	255,25	72,45	227,49
360	64,90	175,01	119,86	53,30	27,99	267,19	99,19	261,27
380	74,37	148,84	101,41	60,26	45,87	260,27	93,32	294,74
400	114,82	170,61	169,45	75,65	61,42	305,11	96,64	295,94
420	151,17	176,88	121,58	87,13	77,95	349,07	120,71	358,58

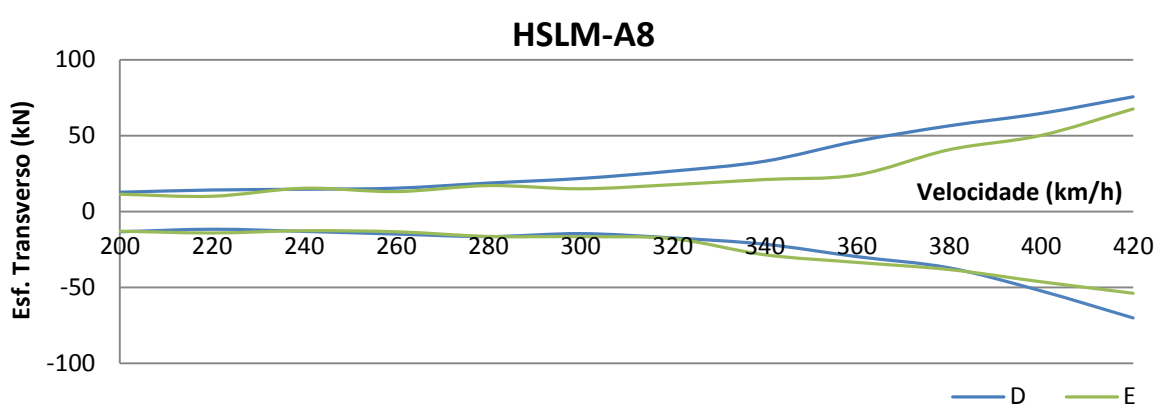
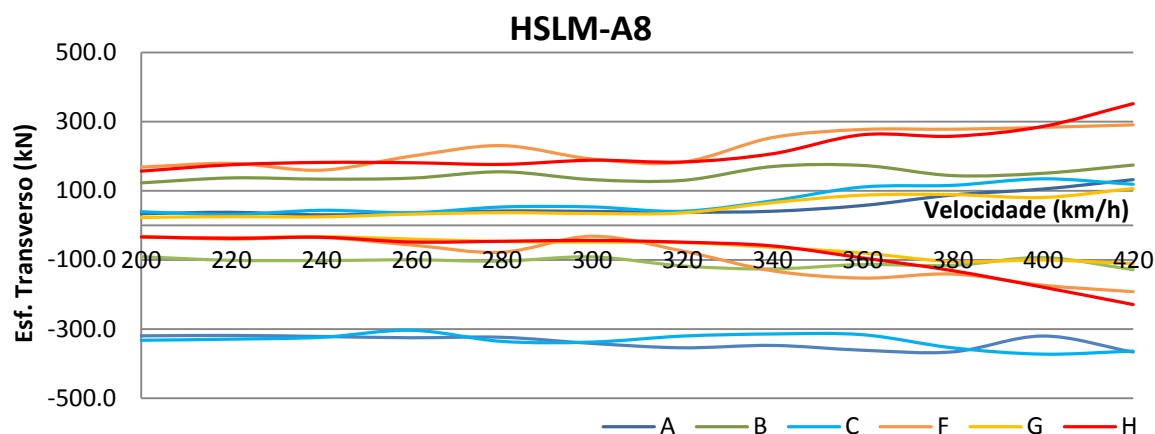
Comboio HSLM-A7								
Esforço transverso negativo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-348,59	-97,45	-349,40	-14,34	-12,65	-26,25	-37,16	-33,34
220	-336,04	-107,81	-353,52	-13,20	-15,12	-51,05	-39,53	-43,29
240	-351,09	-117,10	-351,41	-14,55	-12,44	-45,76	-33,58	-39,40
260	-353,14	-111,10	-322,31	-16,91	-13,18	-76,38	-43,76	-44,22
280	-344,33	-107,74	-347,73	-17,21	-16,40	-78,82	-45,10	-52,01
300	-353,50	-99,40	-366,42	-17,20	-20,05	-28,85	-47,69	-40,65
320	-369,70	-128,16	-363,25	-18,37	-18,71	-80,94	-51,39	-67,27
340	-358,22	-137,32	-347,36	-24,58	-24,27	-128,66	-67,13	-86,72
360	-377,33	-128,02	-347,01	-31,84	-31,33	-140,68	-89,69	-105,60
380	-378,96	-125,64	-357,45	-40,65	-44,06	-169,25	-101,50	-143,25
400	-346,37	-104,00	-375,77	-56,57	-57,08	-206,08	-115,12	-219,19
420	-412,79	-143,71	-413,76	-78,70	-66,42	-249,10	-111,39	-280,66



Anexo A8.7 - Esforço transverso máximo positivo e negativo para cada uma das secções a analisar a) Esf. transversal b) Esf. transversal horizontal

Comboio HSLM-A8								
Esforço transverso positivo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	33,75	122,97	39,35	12,79	11,46	168,64	23,14	156,99
220	37,85	137,35	31,44	14,26	10,13	179,31	25,07	175,42
240	30,58	133,82	43,69	14,75	15,40	159,76	24,71	182,21
260	35,45	136,70	36,71	15,47	13,20	200,44	32,41	181,28
280	41,71	155,03	53,18	18,82	17,16	230,74	36,75	176,38
300	40,46	132,40	53,36	21,86	15,05	192,18	34,21	188,63
320	37,98	130,09	40,95	26,71	17,77	182,95	36,03	183,33
340	40,94	170,25	71,00	33,22	21,16	254,04	65,81	207,24
360	57,45	173,38	110,99	46,40	24,20	277,52	87,44	262,25
380	87,96	144,10	115,92	56,54	40,77	278,23	89,11	257,92
400	105,18	150,71	134,74	64,73	50,24	283,63	80,79	286,37
420	132,34	174,65	118,89	75,71	67,68	290,83	106,79	352,27

Comboio HSLM-A8								
Esforço transverso negativo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-319,68	-90,74	-332,49	-13,28	-12,88	-32,57	-33,56	-33,33
220	-318,44	-101,08	-329,18	-11,60	-14,06	-39,56	-35,85	-37,61
240	-321,46	-101,91	-323,92	-13,05	-12,58	-35,13	-32,88	-34,31
260	-325,21	-99,64	-303,55	-14,80	-13,28	-56,84	-39,58	-48,16
280	-323,79	-103,45	-335,68	-16,46	-16,37	-77,72	-46,58	-46,06
300	-341,58	-91,13	-337,66	-14,49	-16,54	-31,36	-48,31	-43,36
320	-354,24	-117,33	-320,35	-17,34	-17,82	-73,91	-49,42	-48,58
340	-347,39	-126,09	-314,25	-21,48	-28,44	-131,43	-63,40	-59,41
360	-361,28	-113,22	-316,38	-29,66	-33,46	-152,56	-79,82	-94,21
380	-366,06	-115,85	-354,38	-37,04	-38,17	-140,98	-104,78	-131,11
400	-320,20	-93,17	-372,61	-52,25	-46,24	-173,31	-100,11	-178,88
420	-366,61	-128,16	-363,78	-70,07	-53,80	-191,97	-110,59	-229,07



Anexo A8.8 - Esforço transverso máximo positivo e negativo para cada uma das secções a analisar a) Esf. transverso vertical b) Esf. transverso horizontal

Comboio HSLM-A9								
Esforço transverso positivo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	39,31	148,61	41,11	13,36	11,34	176,44	23,72	170,94
220	39,33	157,44	39,04	14,60	12,30	211,36	29,65	198,15
240	43,96	157,89	47,42	15,83	17,60	176,64	28,77	190,31
260	33,22	162,66	51,52	19,42	16,30	213,17	34,37	192,46
280	63,27	184,24	57,25	23,04	19,42	247,65	45,88	181,96
300	45,98	155,28	48,10	27,02	16,98	223,86	37,66	242,99
320	43,60	155,96	39,15	32,80	20,40	227,08	40,60	204,90
340	47,43	194,63	73,77	39,98	23,02	281,43	77,20	232,11
360	51,91	216,41	111,26	57,90	35,80	292,84	94,71	264,04
380	85,17	158,45	127,38	74,50	44,11	343,60	121,81	326,35
400	120,03	152,74	182,32	83,69	54,88	424,28	92,53	321,73
420	125,48	168,41	191,90	94,00	79,96	428,24	117,89	382,90

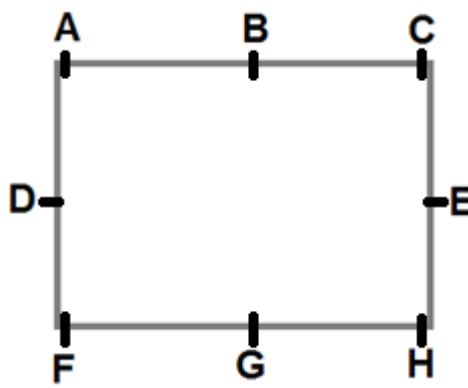
Comboio HSLM-A9								
Esforço transverso negativo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-384,85	-110,33	-374,32	-14,97	-16,03	-29,42	-37,23	-36,85
220	-375,21	-131,57	-394,21	-15,09	-16,32	-45,56	-41,13	-47,84
240	-388,72	-113,80	-395,70	-18,50	-12,98	-41,44	-38,20	-35,00
260	-380,13	-131,56	-366,47	-20,98	-14,57	-58,44	-44,14	-49,71
280	-383,64	-121,53	-380,58	-17,64	-17,86	-95,83	-48,90	-60,32
300	-396,41	-123,02	-392,91	-17,55	-21,25	-51,22	-50,83	-64,54
320	-402,48	-134,34	-391,54	-19,57	-26,15	-83,68	-57,99	-70,10
340	-392,75	-138,72	-385,93	-24,26	-32,58	-167,15	-74,37	-87,68
360	-414,86	-124,43	-383,64	-38,36	-39,65	-205,73	-89,85	-102,65
380	-418,99	-138,43	-414,77	-52,36	-40,48	-222,33	-130,25	-144,46
400	-452,05	-118,76	-413,14	-65,85	-50,67	-297,49	-140,28	-193,52
420	-467,15	-154,34	-445,06	-80,66	-56,54	-303,41	-146,62	-275,77

Comboio HSLM-A10								
Esforço transverso positivo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	38,54	151,95	39,24	16,84	12,72	172,53	25,94	172,36
220	34,21	157,73	42,62	15,69	12,44	210,31	26,48	193,54
240	42,41	153,20	40,40	15,58	15,76	183,19	26,06	183,59
260	35,53	164,77	43,58	19,43	15,82	201,88	34,37	188,48
280	52,16	180,74	51,88	22,44	19,35	247,39	46,14	183,93
300	50,64	151,20	58,48	27,48	15,62	224,33	40,18	215,91
320	41,61	151,84	46,25	32,80	22,08	227,65	40,60	214,51
340	49,50	183,70	56,13	39,14	23,11	281,41	62,19	232,11
360	47,72	221,90	116,58	52,72	36,79	292,61	85,58	246,18
380	78,14	158,50	111,40	75,68	42,98	307,83	86,39	290,44
400	119,04	134,56	148,77	86,95	53,48	413,35	101,18	315,87
420	158,94	168,21	189,56	91,85	83,03	456,97	128,32	413,81

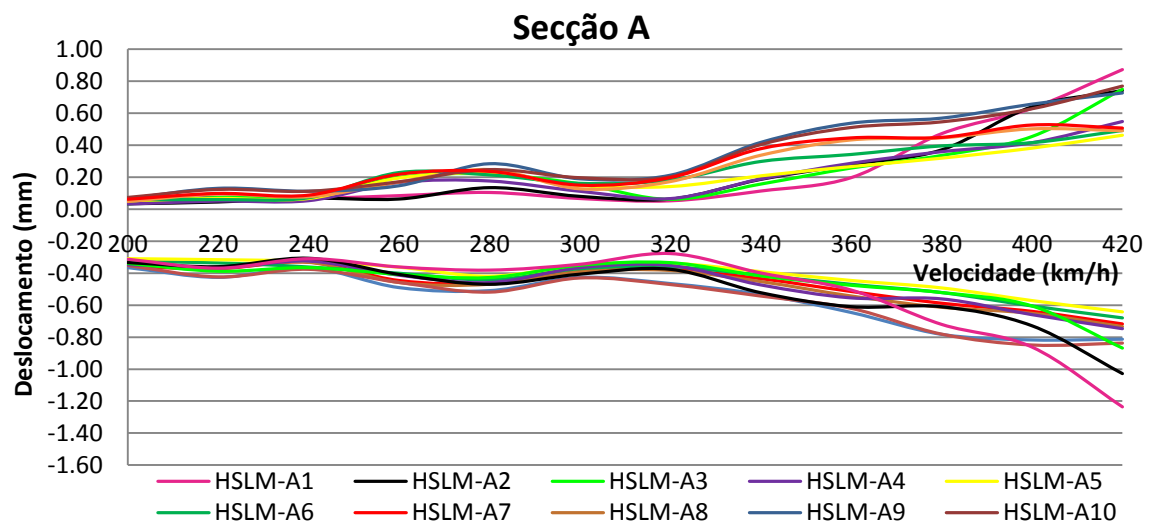
Comboio HSLM-A10								
Esforço transversal negativo (kN)								
Velocidade (km/h)	A	B	C	D	E	F	G	H
200	-382,35	-117,27	-383,98	-15,71	-16,14	-30,77	-33,09	-36,85
220	-380,24	-124,16	-378,85	-16,04	-21,17	-44,87	-38,72	-47,84
240	-386,08	-107,41	-391,70	-17,56	-14,90	-37,09	-37,19	-32,92
260	-379,45	-132,28	-368,11	-17,83	-15,36	-62,29	-45,93	-51,08
280	-383,03	-117,13	-380,61	-18,03	-17,16	-76,09	-49,06	-55,55
300	-393,49	-119,74	-405,84	-18,24	-22,26	-52,16	-50,49	-82,05
320	-402,32	-128,88	-385,37	-19,30	-22,73	-90,28	-56,69	-75,78
340	-389,96	-132,93	-378,68	-24,26	-28,15	-158,34	-69,34	-69,30
360	-416,95	-124,23	-385,46	-38,98	-33,99	-187,25	-86,05	-84,93
380	-419,85	-141,90	-407,58	-55,81	-45,37	-205,88	-100,79	-146,66
400	-370,58	-118,13	-416,12	-71,80	-56,24	-310,46	-145,48	-189,43
420	-457,00	-153,62	-444,23	-86,38	-66,52	-355,63	-162,45	-256,39

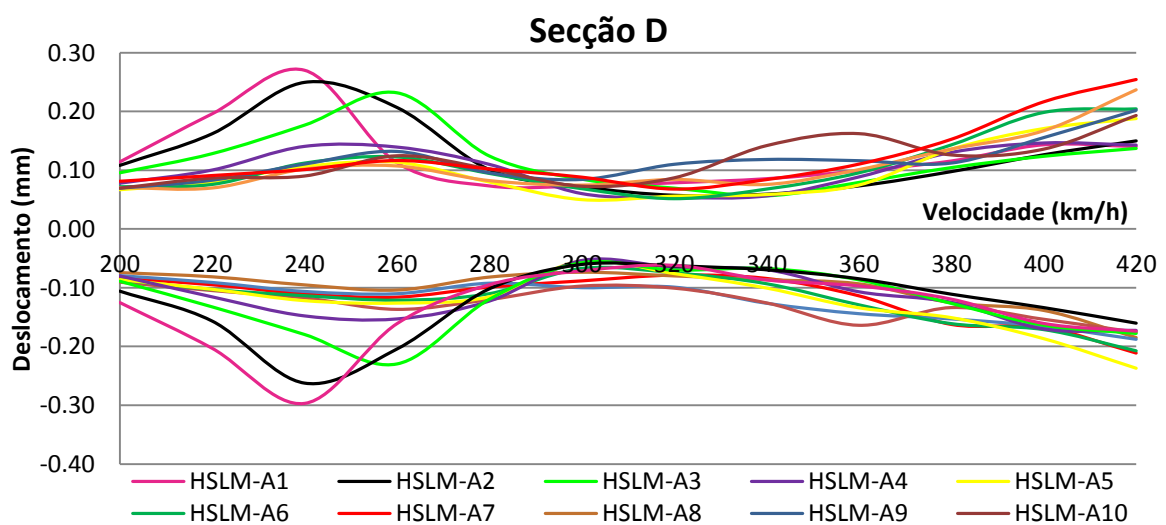
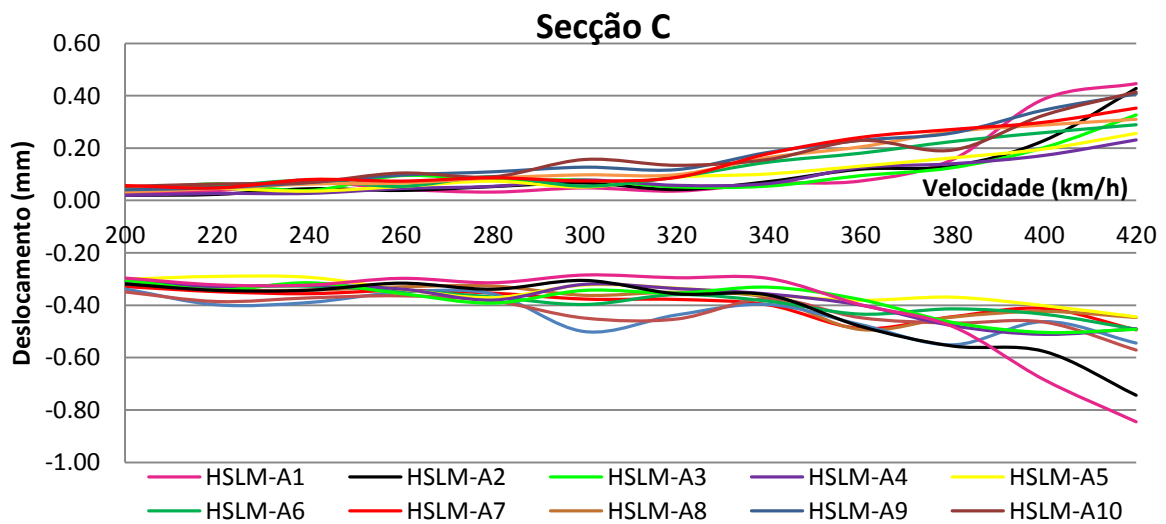
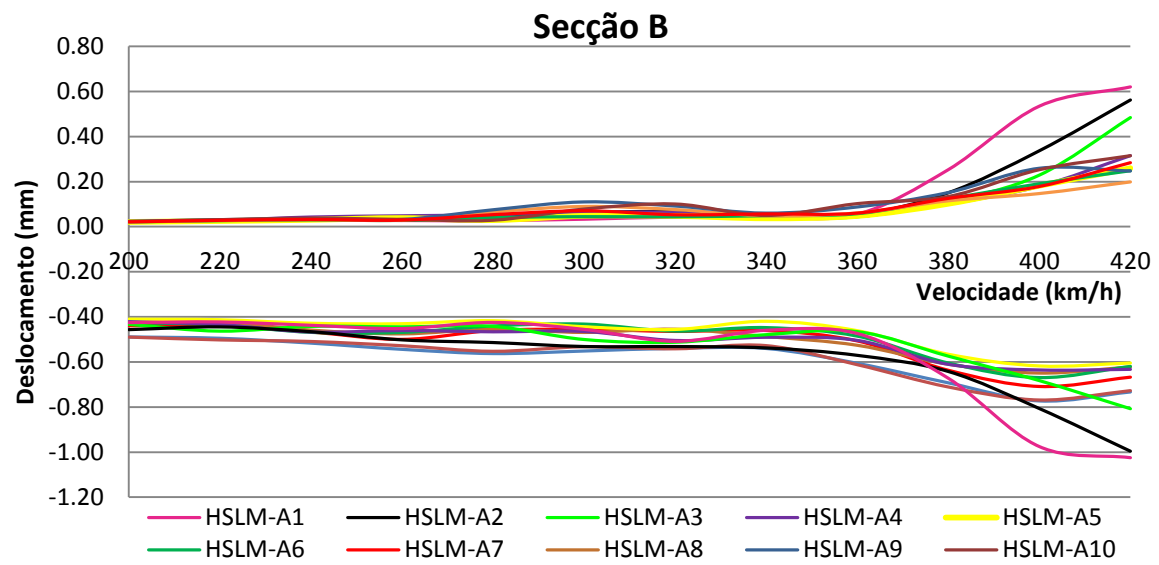
Anexo A9

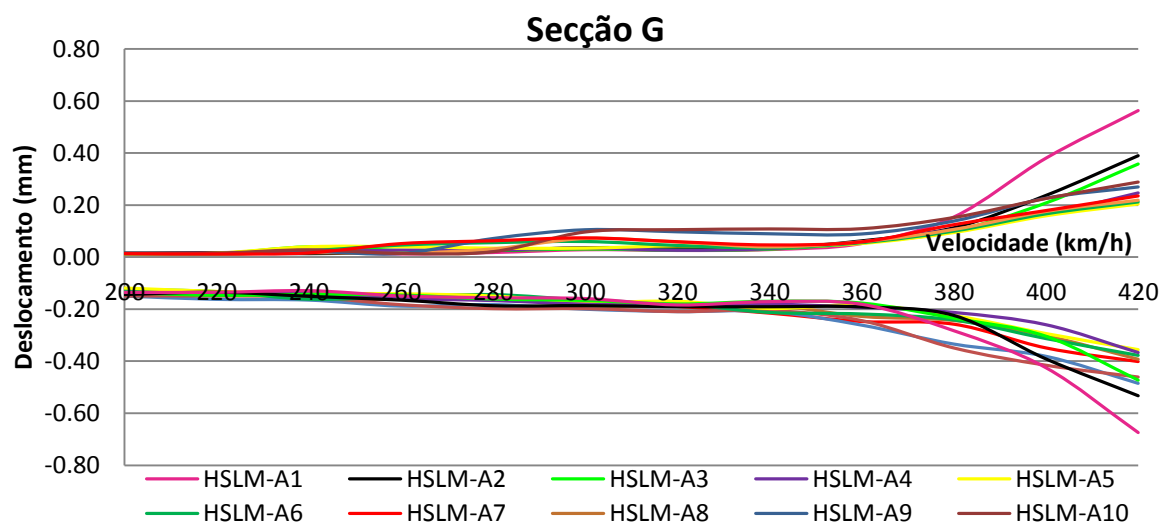
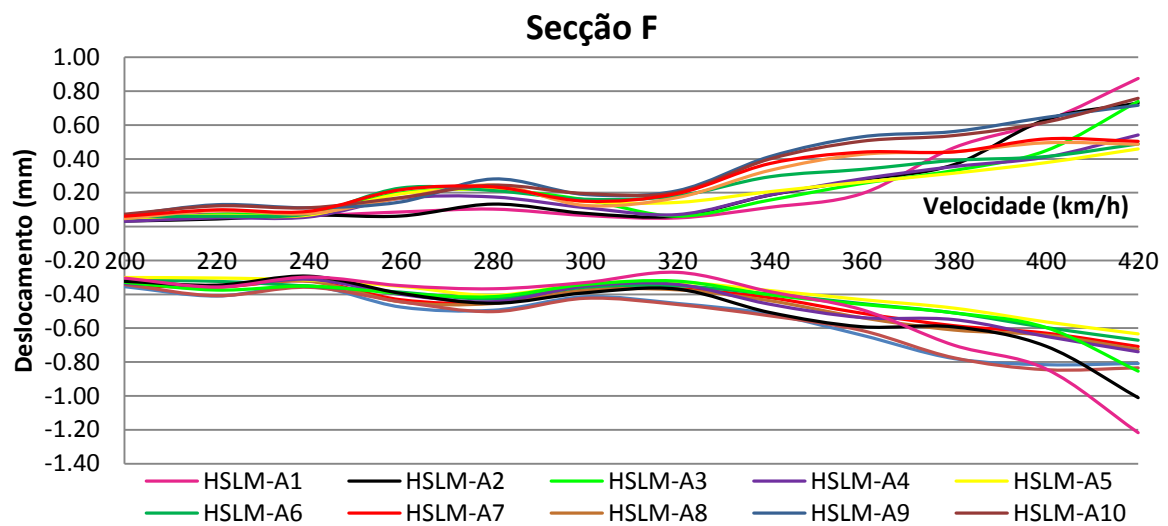
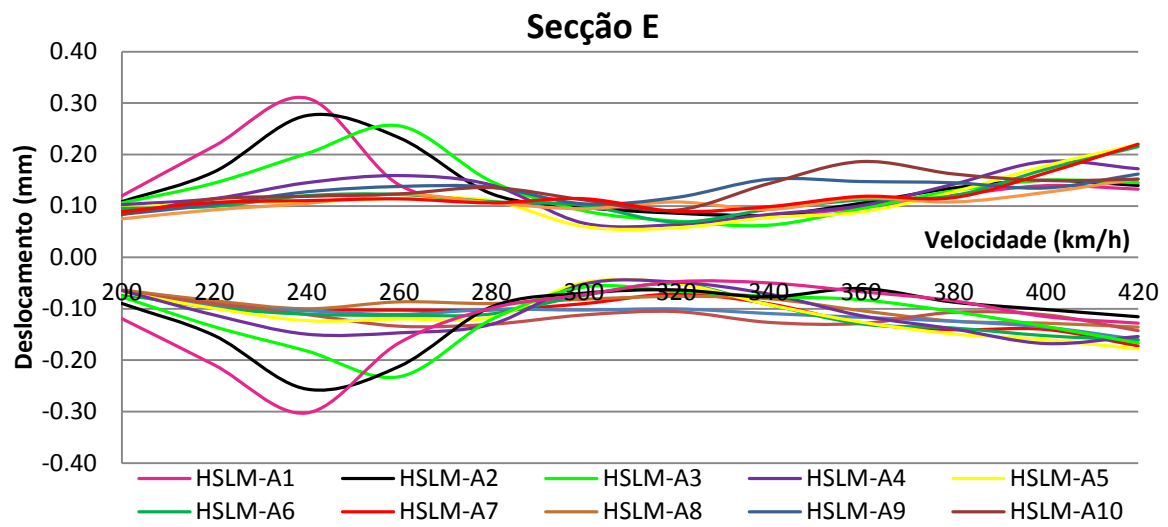
COMPARAÇÃO DAS RESPOSTAS DINÂMICAS DE CADA SECÇÃO PARA TODOS OS COMBOIOS

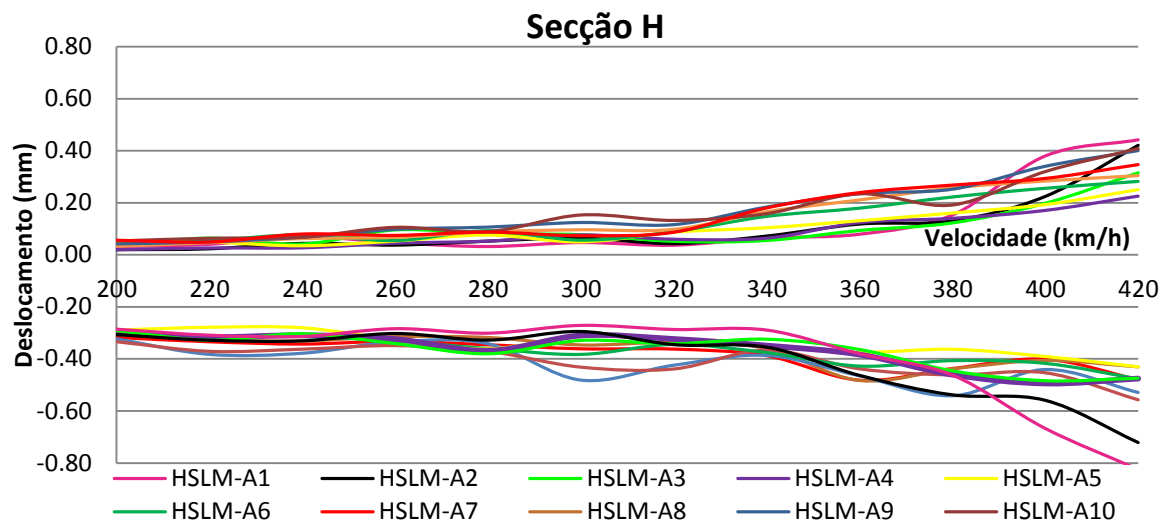


A9.1. DESLOCAMENTOS

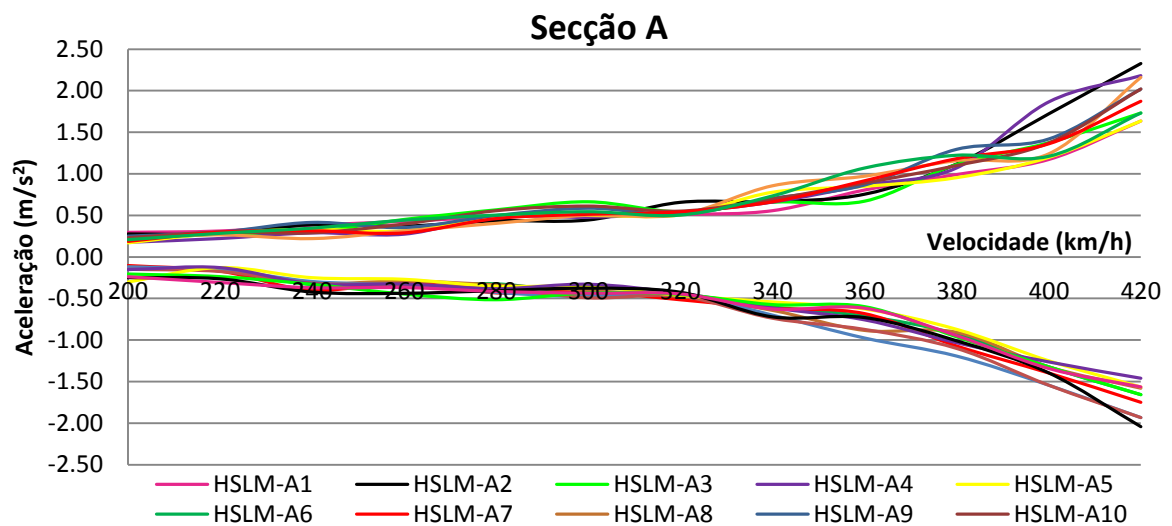


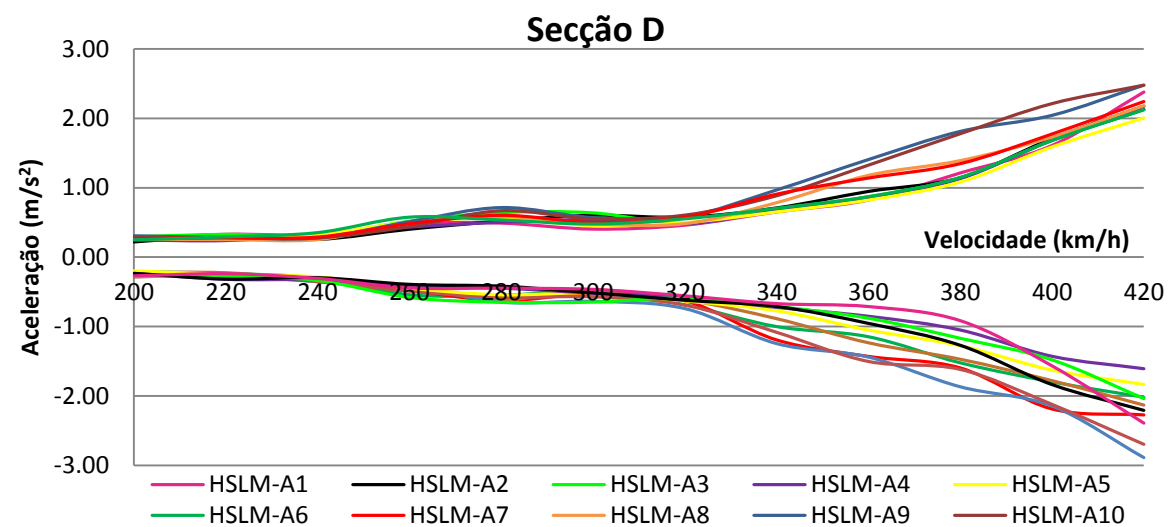
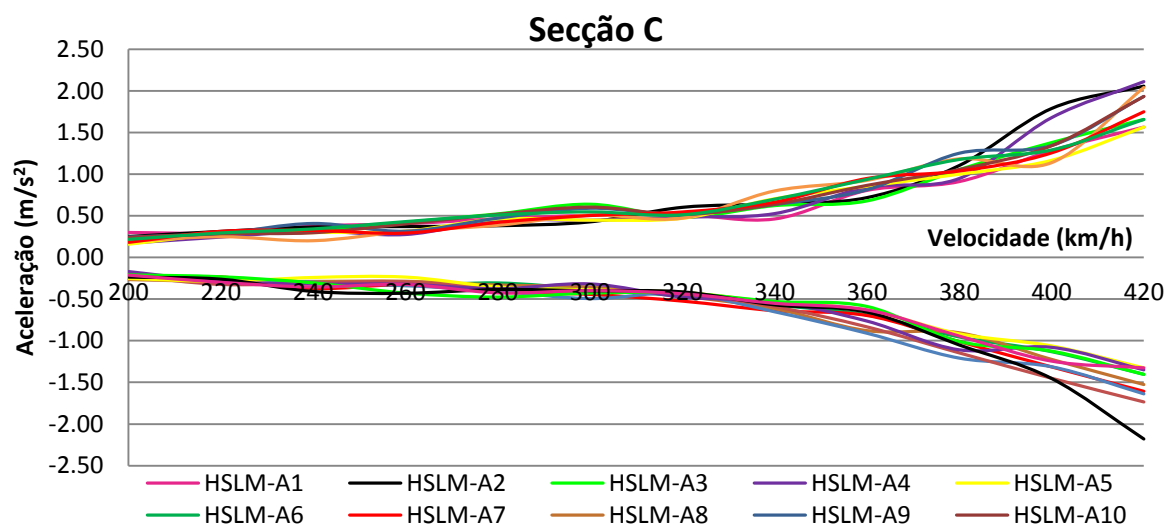
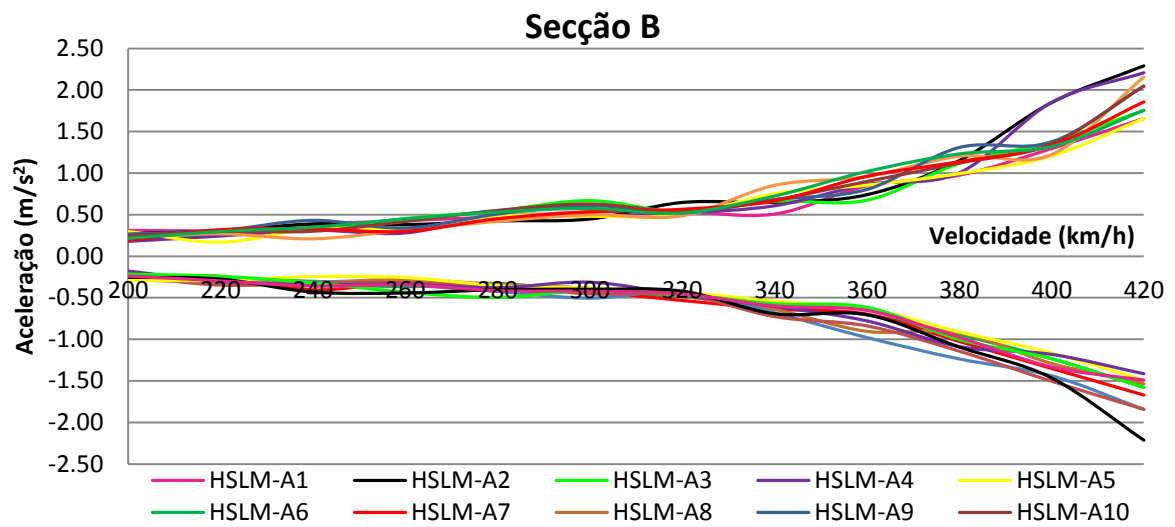


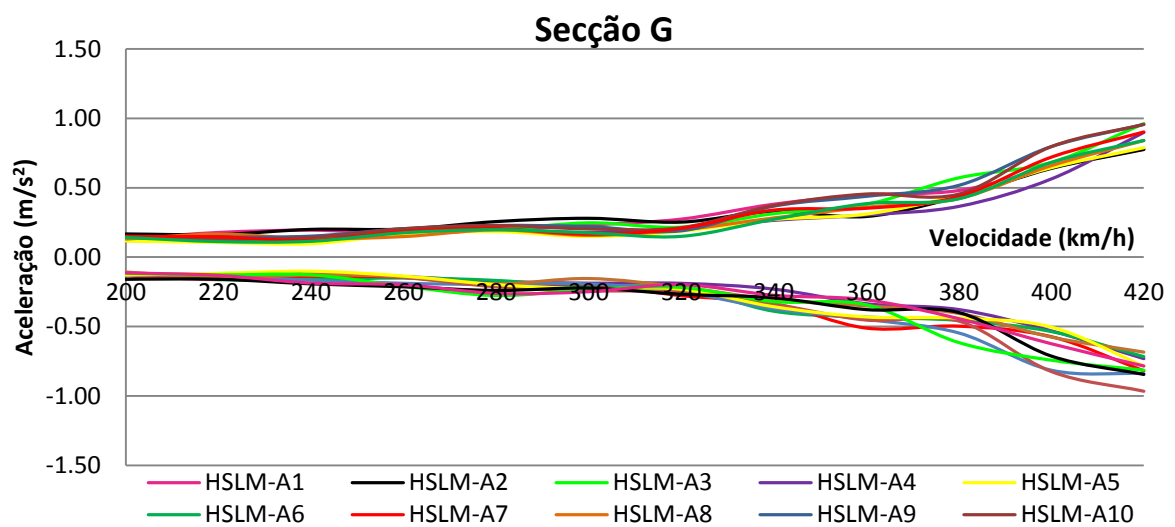
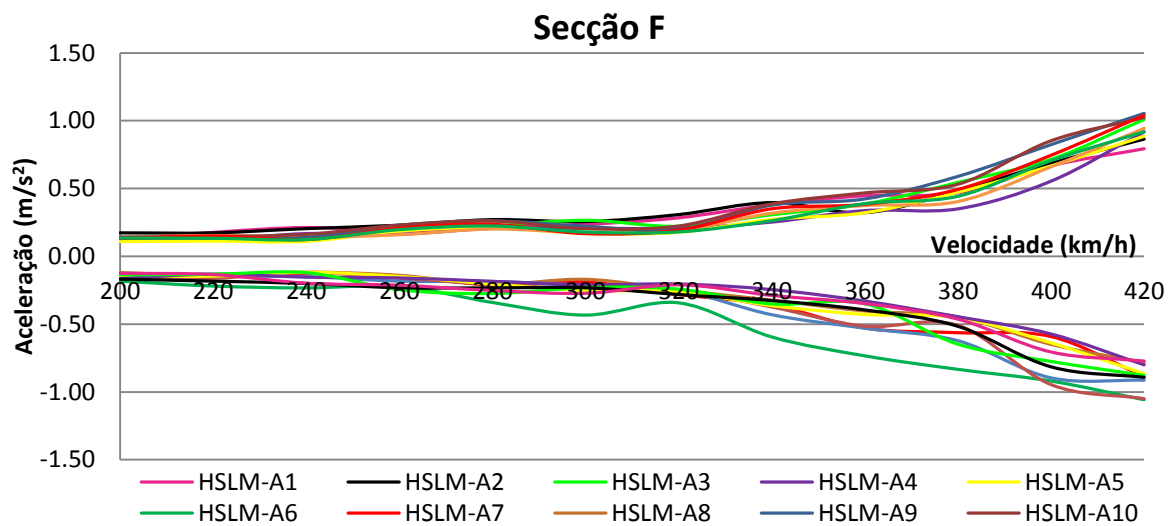
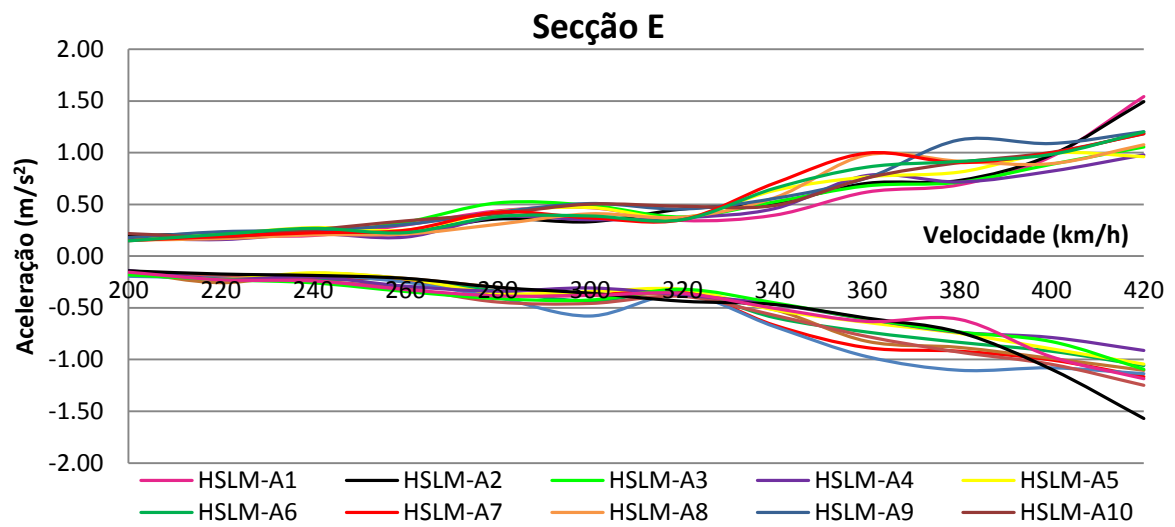


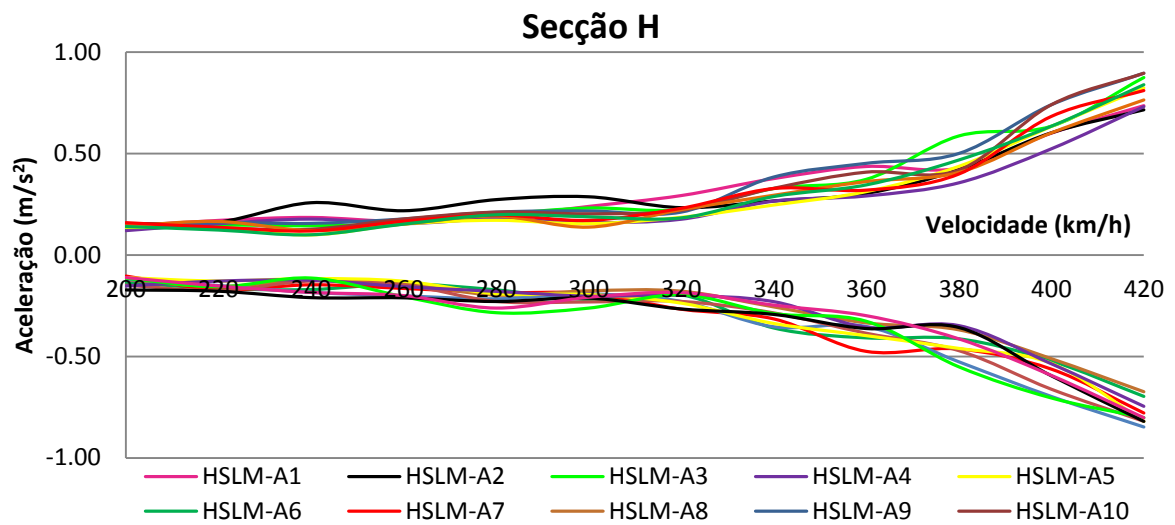


A9.2. ACELERAÇÕES

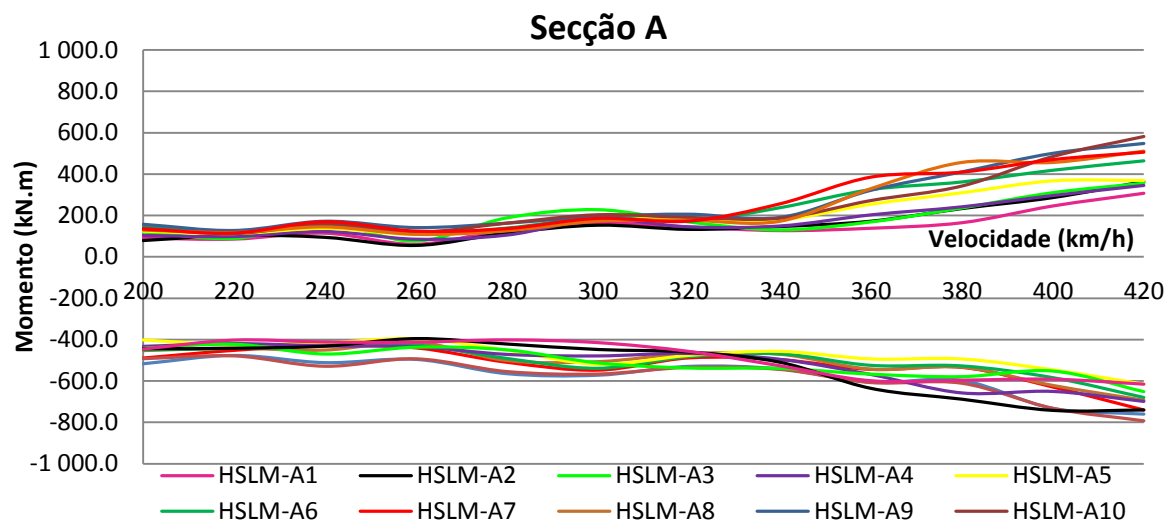


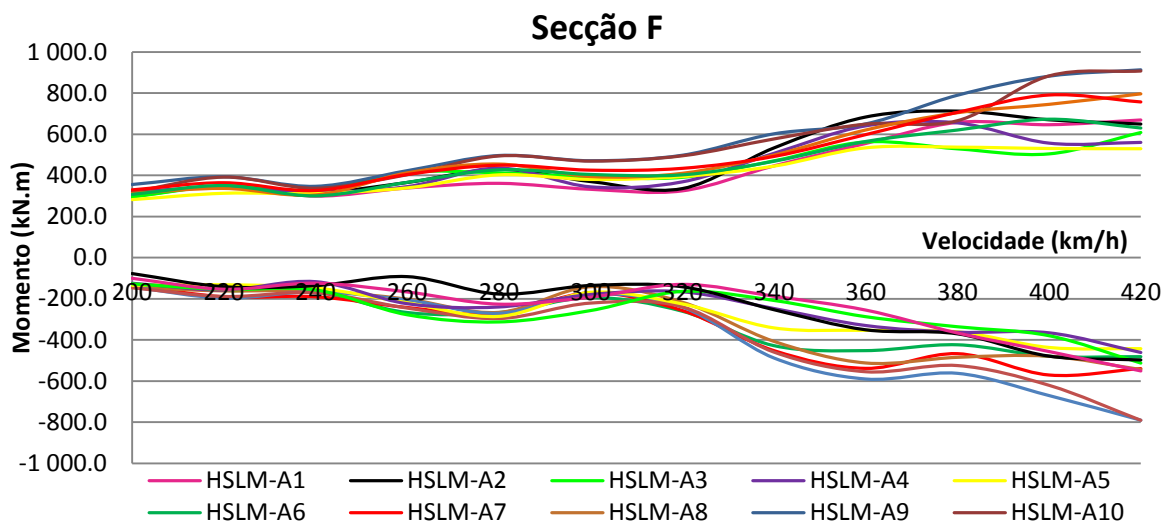
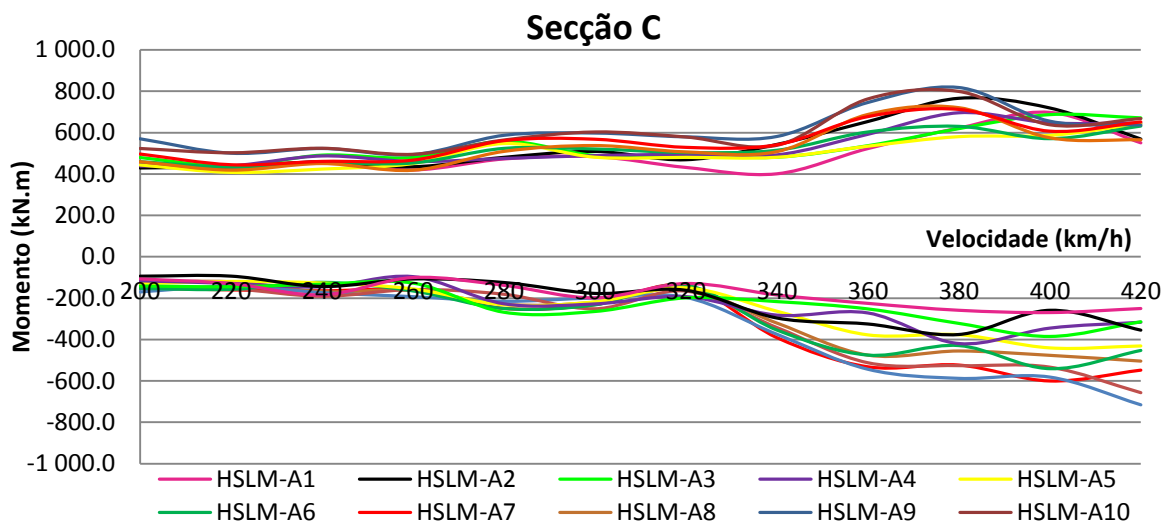
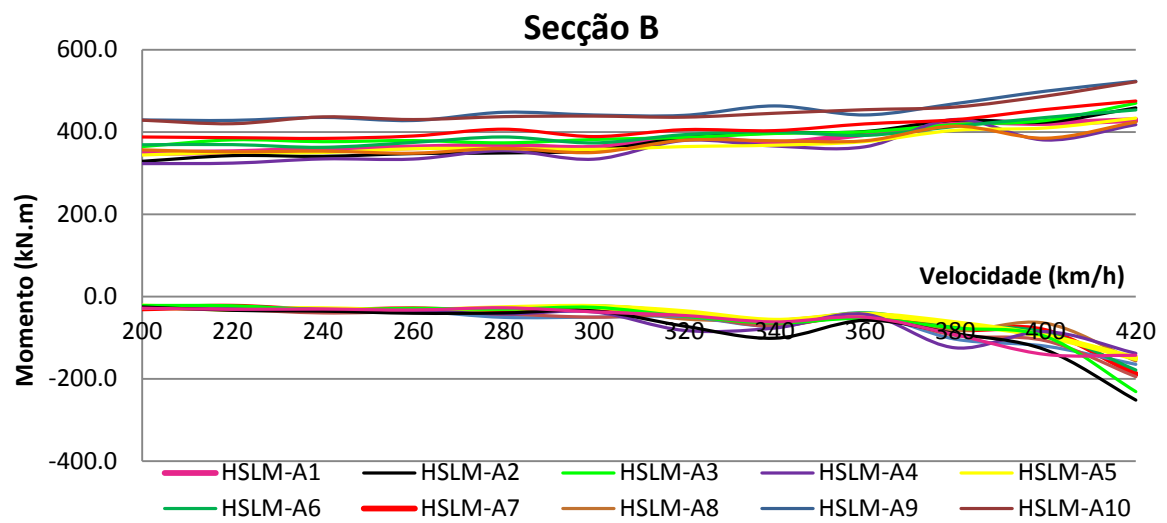


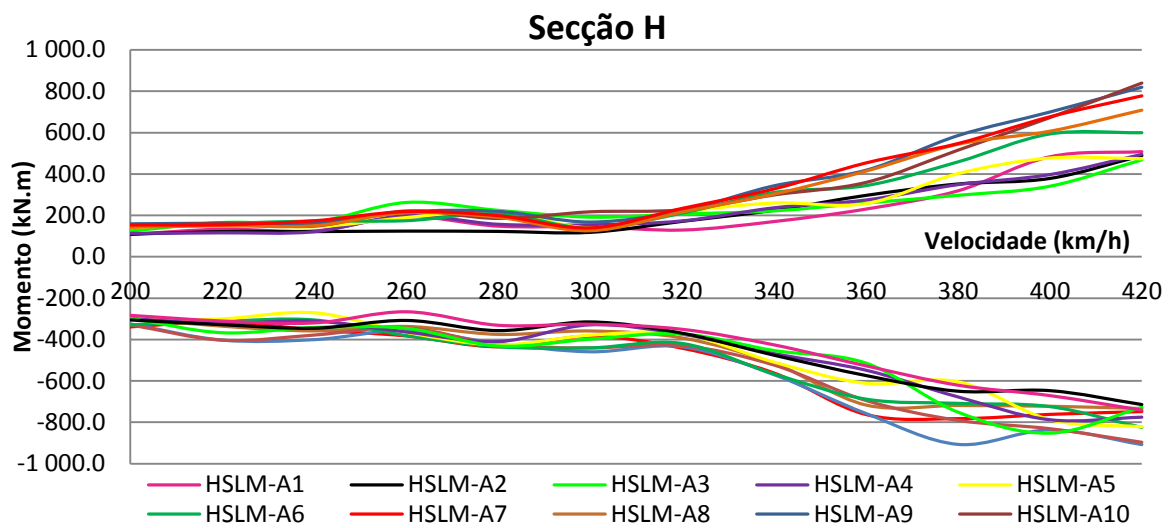
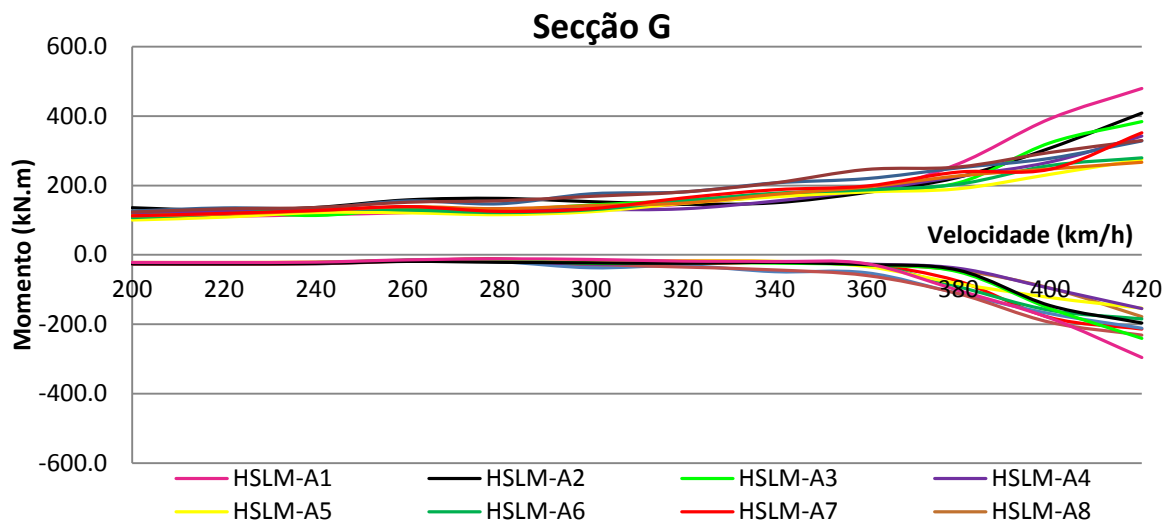




A9.3. MOMENTOS FLECTORES







A9.4. ESFORÇOS TRANSVERSOS