

ANÁLISE NUMÉRICA DA ALTERAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO GEOMECÂNICO INDUZIDA PELO TRÁFEGO FERROVIÁRIO

AIRES MANUEL SILVA COLAÇO

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

Orientador: Professor Doutor Pedro Miguel Barbosa Alves Costa

JULHO DE 2012

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2011/2012

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 - 2011/2012 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2012.*

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 Irmã

A parte que ignoramos é muito maior que tudo quanto sabemos.

Platão

AGRADECIMENTOS

No fim de um longo período de trabalho, quero expressar o meu profundo agradecimento ao meu orientador, Professor Pedro Alves Costa, pelo constante apoio e motivação na elaboração da presente dissertação, sem esquecer a disponibilidade demonstrada a cada momento e a enorme capacidade de transmissão de conhecimentos.

Ao Professor Rui Calçada agradeço o convite realizado para integrar o grupo de investigação por ele coordenado, possibilitando o desenvolvimento deste trabalho. Quero também deixar uma palavra de gratidão ao Professor António Topa Gomes pelos conselhos dados no início desta etapa.

Não podia deixar uma referência a todos os colegas de faculdade, com os quais partilhei momentos e histórias inesquecíveis, construindo enormes amizades que permanecerão para sempre. O meu muito obrigado a todos. Ficarão para sempre na memória!

Ao Carlos agradeço a disponibilidade demonstrada e os seus conselhos, sempre úteis na construção de todo este caminho. Ao Zé e à Cândida deixo a minha profunda gratidão pela enorme disponibilidade transmitida, principalmente nos primeiros anos deste trajeto.

À Suzana agradeço a sua interminável paciência e apoio demonstrados ao longo da realização desta dissertação, facilitando em muito o árduo trabalho de elaboração da mesma.

Por último, queria deixar uma palavra de profundo reconhecimento e estima aos meus pais, irmã e avós por todos os ensinamentos e valores que me foram transmitindo ao longo dos anos, fulcrais para tornar tudo isto numa realidade. A eles o meu sincero Bem-haja.

RESUMO

A presente dissertação apresenta um estudo numérico sobre as alterações do estado de tensão geomecânico induzidas pela ação do tráfego ferroviário. Para tal, recorre-se a um modelo numérico 2.5D, de carácter tridimensional, capaz de simular a globalidade da estrutura férrea e a circulação do comboio.

Após uma apresentação sucinta dos vários elementos constituintes da estrutura da via-férrea, distinguindo-se a via balastrada da via não balastrada, são apresentados os princípios base do método numérico adotado, baseado no conceito 2.5D e formulado com base no Método dos Elementos Finitos (MEF). Apresentam-se ainda, as hipóteses adotadas na modelação dos vários elementos da estrutura ferroviária, desde o carril até ao maciço de fundação, chamando-se a atenção para a metodologia de modelação das fronteiras do problema, conhecida pela sigla PML (*Perfect Matched Layers*).

O modelo adotado tem ainda a particularidade de funcionar com base nos conceitos de subestruturação, permitindo uma análise independente da resposta dinâmica, devido à interação veículo-via, e da resposta originada pela interação via-macício de fundação, com todos os benefícios inerentes a um funcionamento modular.

Um pequeno exemplo muito simples documentado na bibliografia da especialidade é revisto e analisado com base no modelo proposto, dotando o autor de uma capacidade crítica superior, fulcral para a análise de problemas mais complexos, como é o caso da simulação do tráfego ferroviário. As alterações do estado de tensão, considerando diversos pontos de análise do maciço de fundação e diferentes velocidades de circulação do comboio, são sistematizadas recorrendo à sua representação em trajetórias de tensão, num *diagrama p-q*. Os estudos paramétricos realizados dividem-se entre a consideração da componente quasi-estática da resposta à passagem do comboio e, numa fase posterior, avalia-se o grau de influência da resposta dinâmica devido à consideração da interação veículo-via.

Com base nos conhecimentos adquiridos ao longo da realização dos estudos paramétricos referidos anteriormente, apresenta-se a descrição, ainda que sucinta, de um ensaio laboratorial – ensaio torsional com cilindro vazado - que permite, de uma forma realista, a simulação das complexas trajetórias de tensão induzidas no solo de fundação pela passagem do tráfego ferroviário.

PALAVRAS-CHAVE: linha férrea, modelo 2.5D FEM-PML, trajetórias de tensão, mecanismos de excitação quasi-estático e dinâmico, ensaio torsional com cilindro vazado.

ABSTRACT

In the present dissertation, a numerical study of the geomechanical stress state evolution induced by the railway traffic is presented. A 2.5D formulation with the ability to account the dynamic train-track interaction is considered.

After a brief presentation of several elements of the rail track, where the non-ballasted and ballasted tracks are distinguished, the basic principles of the numerical method, based on the 2.5D formulation and Finite Element Method, are presented. Also, the hypotheses adopted to the rail track elements modeling, from the rail to the foundation structure, are presented, standing out the methodology of the boundaries modeling known by PML (Perfect Matched Layers).

The model works based on the concepts of substructuring, allowing an independent analysis of the dynamic behavior due to the train-track and track-foundation interaction, with all the modular behavior advantages.

Based on this model, a small example described in some papers is reviewed and analyzed. The analysis of this example provides the essential tools to the analysis of more complex problems, such as the railway traffic modeling. Considering different geometric points in the foundation and different train velocities, the evolution of stress state in the ground foundation is organized using stress paths representation in the p - q space. The parametric studies carried out are divided into, at a former stage, the consideration of the quasi-static component of the response induced by the train movement and, at a later stage, the assessment of the dynamic influence in the response due to consideration of the rail-track interaction.

Based on knowledge acquired during the implementation of previous parametric studies, a brief description of the hollow cylinder torsional shear test is presented. This laboratory test allows the simulation of complex stress paths induced in the ground by the railway traffic.

KEYWORDS: railway, 2.5D FEM-PML, stress paths, quasi-static and dynamic excitation mechanisms, hollow cylinder torsional shear test.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT.....	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS/ENQUADRAMENTO DO TEMA.....	1
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	4
2. ESTRUTURA DE UMA VIA-FÉRREA.....	7
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	7
2.2. VIA-FÉRREA BALASTRADA	8
2.2.1. CARRIS	9
2.2.2. SISTEMA DE FIXAÇÃO	10
2.2.3. TRAVESSAS.....	12
2.2.4. BALASTRO.....	12
2.2.5. SUB-BALASTRO.....	13
2.2.6. FUNDAÇÃO	13
2.3. VIA-FÉRREA NÃO BALASTRADA	14
3. APRESENTAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS 2.5D	17
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
3.2. TRAÇOS GERAIS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS 2.5D NA MODELAÇÃO DA INTERAÇÃO VIA-MACIÇO DE FUNDAÇÃO	19
3.2.1. PRINCÍPIO BASE	19
3.2.2. ANÁLISE ELÁSTICA	20
3.2.3. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	21
3.2.4. EXIGÊNCIAS DE DISCRETIZAÇÃO NA MODELAÇÃO	22
3.2.5. MODELAÇÃO DO CARRIL E PALMILHAS.....	22
3.2.6. MODELAÇÃO DAS TRAVESSAS.....	23
3.2.7. MODELAÇÃO DO BALASTRO, SUB-BALASTRO E FUNDAÇÃO	23
3.3. MODELAÇÃO DA INTERAÇÃO COMBOIO-VIA	25
3.3.1. MECANISMOS DE EXCITAÇÃO	25
3.3.2. PRINCÍPIO BASE NA MODELAÇÃO.....	26
3.4. ESTUDO PRELIMINAR	27
3.4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	27
3.4.2. DESCRIÇÃO DO MODELO FÍSICO E MODELAÇÃO NUMÉRICA.....	27

3.4.3.	ANÁLISE DE RESULTADOS	29
4.	ALTERAÇÕES NO ESTADO DE TENSÃO INDUZIDAS PELA AÇÃO DE TRÁFEGO FERROVIÁRIO	35
4.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS	35
4.2.	MODELAÇÃO NUMÉRICA E CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA	36
4.3.	DEFINIÇÃO DO DIAGRAMA P-Q	38
4.4.	ESTUDO DAS ALTERAÇÕES NO ESTADO DE TENSÃO INDUZIDAS PELA PASSAGEM DE UMA CARGA ELEMENTAR (MECANISMO QUASI-ESTÁTICO)	40
4.4.1.	EVOLUÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE TENSÃO EM PROFUNDIDADE	40
4.4.2.	EVOLUÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE TENSÃO COM A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE	47
4.4.3.	EVOLUÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE TENSÃO COM O AFASTAMENTO AO EIXO DE SIMETRIA	53
4.5.	ESTUDO DAS ALTERAÇÕES NO ESTADO DE TENSÃO INDUZIDAS PELA CIRCULAÇÃO FERROVIÁRIA (MECANISMO QUASI-ESTÁTICO)	57
4.5.1.	MODELAÇÃO DO COMBOIO ALFA-PENDULAR	57
4.5.2.	EVOLUÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE TENSÃO EM PROFUNDIDADE	59
4.5.3.	EVOLUÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE TENSÃO COM A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE	64
4.5.4.	EVOLUÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE TENSÃO COM O AFASTAMENTO AO EIXO DE SIMETRIA	67
4.6.	ESTUDO DAS ALTERAÇÕES NO ESTADO DE TENSÃO PRECONIZADAS PELO MECANISMO DE EXCITAÇÃO DINÂMICO	68
4.6.1.	OBJETIVOS DO ESTUDO E ASPETOS ESPECÍFICOS DA MODELAÇÃO.....	68
4.6.2.	INFLUÊNCIA DO DETALHE DE MODELAÇÃO DO MATERIAL CIRCULANTE	71
4.6.3.	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO MECANISMO DE EXCITAÇÃO DINÂMICA NAS ALTERAÇÕES DO ESTADO DE TENSÃO	74
4.6.4.	ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE MAJORAÇÃO DAS FORÇAS DE INTERAÇÃO E DAS TENSÕES... 85	
4.7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
5.	SIMULAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DO ESTADO DE TENSÃO ATRAVÉS DE UM ENSAIO LABORATORIAL	91
5.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	91
5.2.	APRESENTAÇÃO DOS ENSAIOS LABORATORIAIS CORRENTES	92
5.3.	ENSAIO TORSIONAL COM CILINDRO VAZADO	94
5.3.1.	APRESENTAÇÃO GERAL DO ENSAIO	94
5.3.2.	PARÂMETROS DE CONTROLO DE TENSÕES, EXTENSÕES E DISTORÇÕES	96
5.3.3.	SIMULAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE TENSÃO INDUZIDAS PELO TRÁFEGO FERROVIÁRIO	98
5.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
6.	CONCLUSÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	103
6.1.	CONCLUSÕES FINAIS	103
6.2.	PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	105
	Bibliografia	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Previsões da rede de alta-velocidade na Europa em 2025 (RAVE, 2008).	2
Figura 1.2 – Representação esquemática da rotação da direção das tensões num dado elemento do solo devido à movimentação de um eixo do comboio ao longo do plano longitudinal: a) Representação das tensões principais; b) Representação das tensões normais e tangenciais (Brown, 1996).	3
Figura 2.1 – Esquema estrutural da via-férrea balastrada: a) perfil longitudinal; b) perfil transversal (Fortunato, 2005).	9
Figura 2.2 – Representação dos perfis UIC60 (Sanzha, 2012).	10
Figura 2.3 – Exemplo tipo de um sistema de fixação (Adaptado de Pandrol Rahee Technologies, 2012).	11
Figura 2.4 – Representação esquemática da influência da rigidez das palmilhas no nível de energia transferido (Alves Costa, 2011).	11
Figura 2.5 – Exemplos de travessas tipo monobloco em betão e travessas em madeira.	12
Figura 2.6 – Exemplo da camada de balastro (FERGRUPO, 2012).	13
Figura 2.7 – Tratamento do solo com ligantes (Fortunato, 2005).	14
Figura 2.8 – Esquema estrutural do perfil transversal de uma via não balastrada (Adaptado de Alves Costa, 2011).	15
Figura 3.1 – Fluxograma representativo da interação entre os vários módulos do modelo de cálculo proposto (Adaptado de Alves Costa, 2011).	18
Figura 3.2 – Caráter infinito e retilíneo da via-férrea (Alves Costa, 2011).	19
Figura 3.3 – Sequência dos principais passos da aplicação do método de elementos finitos 2.5D (Alves Costa, 2011).	20
Figura 3.4 – Representação esquemática do carril e palmilha.	23
Figura 3.5 – Representação esquemática da atenuação da onda ao incidir no PML (Adaptado de Lopes et al, 2012).	25
Figura 3.6 – Malha de elementos finitos 2.5D adotada no estudo em causa.	28
Figura 3.7 – Representação em corte do problema.	29
Figura 3.8 – Representação geométrica do elemento do solo em análise.	29
Figura 3.9 – Evolução do estado de tensão induzidas pelo movimento da carga.	30
Figura 3.10 – Evolução do ângulo das direções principais de tensão com o movimento da carga (Adaptado de Chen <i>et al</i> , 2005).	31
Figura 3.11 – Comparação dos resultados das tensões normais e tangenciais.	32
Figura 3.12 – Relação entre os incrementos da tensão de desvio e da tensão tangencial.	33
Figura 4.1 – Malha de elementos finitos 2.5D adotada ao estudo em causa.	36
Figura 4.2 – Elementos da superestrutura: a) Travessas tipo monobloco; b) Carril UIC60 (Adaptado de Ferroclubchile, 2012).	37
Figura 4.3 – Representação das tensões normais e tangenciais.	38
Figura 4.4 – Representação geométrica dos elementos em análise.	40
Figura 4.5 – Evolução das tensões normais e tangenciais em função da distância da carga móvel (Elemento 1; V=30m/s).	41
Figura 4.6 – Evolução das tensões normais e tangenciais em função da distância da carga móvel (Elemento 3; V=30m/s).	41

Figura 4.7 – Degradação de tensões verticais em profundidade: a) <i>Bolbos de tensões</i> – área quadrada carregada uniformemente; b) Degradação das tensões em profundidade – faixa de desenvolvimento infinito carregada uniformemente (Matos Fernandes, 2006).	42
Figura 4.8 – Evolução das tensões normais em profundidade com a carga sobre secção de referência ($x=0.0$ m).....	43
Figura 4.9 – Evolução das tensões normais em profundidade com a carga a uma distância de $x=1.6$ m da secção de referência.	43
Figura 4.10 – Evolução das tensões normais em profundidade com a carga a uma distância de $x=5.0$ m da secção de referência.	44
Figura 4.11 – Representação, em função do tempo, das alterações do estado de tensão preconizadas pela passagem de uma carga elementar à velocidade de 30m/s: a) Tensão normal σ_x ; b) Tensão normal σ_y ; c) Tensão normal σ_z ; d) Tensão tangencial τ_{xy} ; e) Tensão tangencial τ_{xz} ; f) Tensão tangencial τ_{yz}	45
Figura 4.12 – Evolução das trajetórias de tensão nos pontos pertencentes ao alinhamento 1 ($V=30$ m/s).....	46
Figura 4.13 – Evolução das trajetórias de tensão nos pontos pertencentes ao alinhamento 2 ($V=30$ m/s).....	46
Figura 4.14 – Representação esquemática dos elementos em análise.	48
Figura 4.15 – Registo temporal do incremento de tensão normal σ_z no Elemento 1 para diferentes velocidades de circulação.....	49
Figura 4.16 – Evolução das trajetórias de tensão em função da velocidade de circulação (Elemento 1).....	50
Figura 4.17 – Evolução das trajetórias de tensão em função da velocidade de circulação (Elemento 2).....	51
Figura 4.18 – Representação geométrica dos elementos em análise	53
Figura 4.19 – Evolução das trajetórias de tensão com o afastamento ao eixo de simetria (Elementos superficiais; $V=30$ m/s)	54
Figura 4.20 – Evolução das trajetórias de tensão com o afastamento ao eixo de simetria (Elementos superficiais; $V=100$ m/s)	54
Figura 4.21 – Evolução das trajetórias de tensão com o afastamento ao eixo de simetria (Elementos superficiais; $V=150$ m/s)	55
Figura 4.22 – Evolução das trajetórias de tensão com o afastamento ao eixo de simetria (Elementos a maiores profundidades; $V=150$ m/s).....	56
Figura 4.23 – Evolução das trajetórias de tensão com o afastamento ao eixo de simetria (Elementos a maiores profundidades; $V=100$ m/s).....	57
Figura 4.24 – Comboio Alfa-Pendular: a) Fotografia (CP, 2012); b) Geometria do comboio (Alves Costa, 2011).	58
Figura 4.25 – Representação, em função do tempo, das alterações do estado de tensão preconizadas pela passagem do comboio Alfa-Pendular à velocidade de 30m/s: a) Tensão normal σ_x ; b) Tensão normal σ_y ; c) Tensão normal σ_z ; d) Tensão tangencial τ_{xy} ; e) Tensão tangencial τ_{xz} ; f) Tensão tangencial τ_{yz}	59
Figura 4.26 – Evolução das trajetórias de tensão em profundidade com a passagem do comboio Alfa-Pendular (alinhamento 1, $V=30$ m/s).....	60
Figura 4.27 – Evolução das trajetórias de tensão em profundidade com a passagem dos dois primeiros eixos do comboio (alinhamento 1, $V=30$ m/s).	61
Figura 4.28 – Evolução da tensão normal σ_z em profundidade (alinhamento 1, $V=30$ m/s).	62
Figura 4.29 – Evolução das trajetórias de tensão em profundidade com a passagem do primeiro veículo do comboio (alinhamento 1, $V=30$ m/s).	62
Figura 4.30 – Evolução das trajetórias de tensão em profundidade com a passagem dos dois primeiros veículos do comboio (alinhamento 1, $V=30$ m/s).	63

Figura 4.31 – Evolução das trajetórias de tensão para diferentes velocidades de circulação do comboio Alfa-Pendular (Elemento 1).	64
Figura 4.32 – Evolução das trajetórias de tensão para diferentes velocidades de circulação do comboio Alfa-Pendular (Elemento 2): a) Vista geral; b) Vista de pormenor.	65
Figura 4.33 – Tensões no Elemento 1, em função do tempo, considerando V=30m/s: a) Tensão normal σ_z ; b) Tensão tangencial τ_{xz}	66
Figura 4.34 – Tensões no Elemento 1, em função do tempo, considerando V=150m/s: a) Tensão normal σ_z ; b) Tensão tangencial τ_{xz}	66
Figura 4.35 – Evolução das trajetórias de tensão com o afastamento ao eixo da via devido à passagem do comboio (V=30m/s).	67
Figura 4.36 – Evolução das trajetórias de tensão com o afastamento ao eixo da via devido à passagem do comboio (V=100m/s).	67
Figura 4.37 – Idealização das irregularidades do carril e interação roda-carril (Adaptado de Yang <i>et al</i> , 2009).	69
Figura 4.38 – Representação geométrica dos elementos a analisar.....	72
Figura 4.39 – Comparação dos resultados das tensões do Elemento 1 para as duas formas de modelação do veículo consideradas (Frequência de excitação=4.7 Hz): a) Tensão normal σ_x ; b) Tensão normal σ_y ; c) Tensão normal σ_z ; d) Tensão tangencial τ_{xz}	73
Figura 4.40 – Comparação dos resultados das tensões do Elemento 1 para as duas formas de modelação do veículo consideradas (Frequência de excitação=9.3 Hz): a) Tensão normal σ_x ; b) Tensão normal σ_y ; c) Tensão normal σ_z ; d) Tensão tangencial τ_{xz}	73
Figura 4.41 – Representação da tensão normal σ_z ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 1 de irregularidades e V=70 m/s): a) Elemento 1; b) Elemento 3.	75
Figura 4.42 – Representação da tensão tangencial τ_{xz} ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 1 de irregularidades e V=70 m/s): a) Elemento 1; b) Elemento 3.	75
Figura 4.43 – Representação da tensão normal σ_z ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 3 de irregularidades e V=70m/s): a) Elemento 1; b) Elemento 3.	76
Figura 4.44 – Representação da tensão tangencial τ_{xz} ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 3 de irregularidades e V=70m/s): a) Elemento 1; b) Elemento 3.	76
Figura 4.45 – Representação da tensão normal σ_z ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 5 de irregularidades e V=70m/s): a) Elemento 1; b) Elemento 3.	76
Figura 4.46 – Representação da tensão tangencial τ_{xz} ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 5 de irregularidades e V=70m/s): a) Elemento 1; b) Elemento 3.	77
Figura 4.47 – Representação da tensão normal σ_z ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 6 de irregularidades e V=70m/s): a) Elemento 1; b) Elemento 3.	77
Figura 4.48 – Representação da tensão normal σ_z ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 1 de irregularidades e V=70m/s): a) Elemento 2; b) Elemento 4.	78
Figura 4.49 – Representação da tensão tangencial τ_{xz} ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 1 de irregularidades e V=70m/s): a) Elemento 2; b) Elemento 4.	78

Figura 4.50 – Representação da tensão normal σ_z ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 3 de irregularidades e $V=70\text{m/s}$): a) Elemento 2; b) Elemento 4.	79
Figura 4.51 – Representação da tensão tangencial τ_{xz} ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 3 de irregularidades e $V=70\text{m/s}$): a) Elemento 2; b) Elemento 4.	79
Figura 4.52 – Representação da tensão normal σ_z ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 5 de irregularidades e $V=70\text{m/s}$): a) Elemento 2; b) Elemento 4.	79
Figura 4.53 – Representação da tensão tangencial τ_{xz} ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 5 de irregularidades e $V=70\text{m/s}$): a) Elemento 2; b) Elemento 4.	80
Figura 4.54 – Alterações nas tensões normais resultantes das forças de interação dinâmicas originadas por comprimentos de onda curtos (Elemento 1).....	81
Figura 4.55 – Alterações nas tensões normais resultantes das forças de interação dinâmicas originadas por comprimentos de onda longos (Elemento 1).....	82
Figura 4.56 – Incrementos de tensão no Elemento 1 devido à consideração do mecanismo de excitação dinâmico (Perfil 5 de irregularidades e $V=70\text{ m/s}$)	83
Figura 4.57 – Incrementos de tensão máximos para uma velocidade de 70 m/s (Elemento 1).	83
Figura 4.58 – Incrementos de tensão máximos para uma velocidade de 30 m/s (Elemento 1).	84
Figura 4.59 – Incrementos de tensão máximos para uma velocidade de 15 m/s (Elemento 1).	84
Figura 5.1 – Representação esquemática de exemplos de ensaios laboratoriais (Adaptado de Sayão, 1989).....	94
Figura 5.2 – Amostra utilizada no ensaio de cilindro vazado torsional e respetivo aparelho de ensaio (GSD Instruments, 2009).....	95
Figura 5.3 – Diagrama esquemático do aparelho de ensaio (Gräbe & Clayton, 2009)	96
Figura 5.4 – Esquema do carregamento aplicado e tensões originadas num elemento infinitesimal da amostra.	96
Figura 5.5 – Representação da carga elementar a deslocar-se sobre os carris.	99
Figura 5.6 – Evolução do estado de tensão com a simulação da passagem de uma carga elementar de valor 130 kN (Elemento 1 e $V=30\text{m/s}$).	99
Figura 5.7 – Evolução do estado de tensão através da simulação da realização do ensaio torsional com cilindro vazado.	100
Figura 5.8 – Comparação dos resultados obtidos numericamente com os obtidos através da simulação do ensaio.	101

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Propriedades geomecânicas.....	28
Quadro 4.1 – Propriedades dos vários elementos constituintes da linha férrea.	37
Quadro 4.2 – Razão de tensão $q_{m\acute{a}x}/p_{m\acute{a}x}$ para os diversos pontos pertencentes aos alinhamentos 1 e 2.....	47
Quadro 4.3 – Determinação do fator de amplificação dinâmica para a velocidade de 150m/s.	52
Quadro 4.4 – Evolução dos incrementos de tensão de corte com o afastamento ao eixo.	55
Quadro 4.5 – Cargas transmitidas por eixo do comboio Alfa-Pendular.....	58
Quadro 4.6 – Variação da tensão de corte máxima com o afastamento ao eixo.	68
Quadro 4.7 – Características dos perfis de irregularidades admitidos.	69
Quadro 4.8 – Características mecânicas do comboio Alfa-Pendular.	70
Quadro 4.9 – Divisão em diferentes categorias dos comprimentos de onda e respectivas frequências de oscilação mediante a velocidade.	81
Quadro 4.10 – Avaliação dos coeficientes de majoração para $V=70\text{m/s}$ (252km/h).....	85
Quadro 4.11 – Avaliação dos coeficientes de majoração para $V=30\text{m/s}$ (108km/h).....	86
Quadro 4.12 – Avaliação dos coeficientes de majoração de tensões (Elemento 1).	87
Quadro 4.13 – Avaliação dos coeficientes de majoração de tensões (Elemento 3).	87
Quadro 5.1 – Resumo dos métodos laboratoriais de avaliação de trajetórias de tensão (Adaptado de Sayão, 1989).....	93
Quadro 5.2 – Especificações do equipamento de ensaio no que diz respeito à gama de valores permitida.....	98
Quadro 5.3 – Escalões de carga admitidos para a simulação das alterações ao estado de tensão.	100

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

RAVE – Rede Ferroviária de Alta Velocidade

MEC – Método dos Elementos de Contorno

MEF – Método dos Elementos Finitos

FEM – Finite Elements Method

PML – Perfect Matched Layers

k_1 – Número de onda

$\bar{\omega}$ – Frequência angular

I – Inércia

E – Módulo de deformabilidade

m – Massa

k – Rigidez

c – Amortecimento

G – Módulo de distorção

ν – Coeficiente de Poisson

ρ – Massa volúmica

ξ – Amortecimento

$\sigma_i=S_i$ – Componente da tensão normal na direção i

$\tau_{ij}=T_{ij}$ – Componente da tensão tangencial no plano ij

K_0 – Coeficiente de impulso em repouso

p – Tensão média

q – Tensão de desvio

dp – Incremento de tensão média

dq – Incremento de tensão de desvio

HCT – Hollow Cylinder Torsional

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS/ENQUADRAMENTO DO TEMA

A rede ferroviária é uma parte imprescindível no sistema de transportes das sociedades desenvolvidas. O papel por ela desempenhado é fulcral em termos económicos, sociais e até mesmo ambientais. Apesar destes benefícios inegáveis, a implementação destas estruturas envolve elevados montantes de investimento inicial e de manutenção, levantando ainda alguns problemas nas estruturas próximas à envolvente da linha.

Antes de se entrar em mais detalhe nas questões de índole técnica anteriormente suscitadas, importa realizar um pequeno resumo acerca do desenvolvimento deste tipo de transporte. O transporte ferroviário, surgido em inícios do século XIX, tem sido um dos meios de transporte mais utilizado, percorrendo para tal, um vasto caminho de inovação e desenvolvimento, que com as novas linhas de alta velocidade e os meios tecnológicos implementados nos comboios, culminou num meio de transporte muito competitivo e de generalizada utilização.

O transporte ferroviário, como qualquer outro meio de transporte, está dependente da conjuntura económica e social que vigora em determinado momento. Assim, se justifica a perda de importância deste, em detrimento do transporte rodoviário e aéreo, ocorrida a partir dos meados do século XX. No entanto, a escalada do preço do petróleo que se tem assistido nas últimas décadas, associada à modernização ocorrida neste sistema de transporte, relança-o para uma nova fase de desenvolvimento. A tendência atual aponta para a expansão e modernização das linhas férreas, e com o preço do barril de petróleo praticado nos dias que correm, a supremacia do transporte ferroviário do ponto de vista energético é cada vez mais acentuada.

Além do fator enumerado anteriormente, acresce ainda a questão de índole ambiental, tão sensível e tão atual. A redução de emissões de CO₂ para a atmosfera, discutida pelos países mais desenvolvidos, pode ser aproveitada para o investimento em novas linhas ferroviárias, pois este tipo de transporte apresenta menores emissões (por passageiro) do que os demais meios de transporte, como o rodoviário e o aéreo (Krilov *et al*, 2000).

A União Europeia tem desenvolvido esforços na disponibilização de fundos para a criação e expansão de uma Rede Ferroviária Europeia. O objetivo é interligar os diversos países que a constituem, por

uma moderna linha de alta-velocidade. Este objetivo encontra-se em fase de desenvolvimento e as primeiras previsões das diversas ligações podem ser visualizadas na Figura 1.1. Chama-se no entanto a atenção, que face ao contexto económico que toda a Europa atravessa, algumas destas aspirações possam não chegar a passar de meras pretensões, pelo menos num futuro próximo.



Figura 1.1 – Previsões da rede de alta-velocidade na Europa em 2025 (RAVE, 2008).

Relativamente a Portugal, face ao contexto económico que o país atravessa, não há certezas no rumo das políticas no que diz respeito à implementação de novas linhas ferroviárias, quer de transporte de passageiros, quer de transporte de mercadorias.

Apesar de todas as vantagens conferidas por um sistema de transporte ferroviário, o investimento inicial é avultado. Além deste, há a considerar a manutenção das vias, que representa um esforço financeiro muitíssimo acentuado por parte das administrações ferroviárias. A acumulação de deformações, com a sucessiva passagem de tráfego ferroviário, contribui para o aumento destes custos pelo que um conhecimento adequado destas questões se impõe. Otimizar a utilização e manutenção destas estruturas é vital e exige a melhor tecnologia disponível. Muitos esforços têm sido despendidos nesse sentido e vão de encontro ao ganho de competências que permitam uma melhor compreensão e gestão destas infraestruturas. Esta visão serve quer para as estruturas já existentes, quer para as que serão construídas no futuro, dotando-as dos elementos e técnicas construtivas que melhor desempenhem o papel pretendido.

Num problema tão complexo quanto este, é natural o aparecimento de diversas metodologias de tratamento e análise. De uma forma geral e de acordo com Alves Costa (2011) e Hall (2000), estes diversos procedimentos podem ser divididos em três classes: i) métodos empíricos; ii) métodos analíticos; iii) métodos semi-analíticos e numéricos.

De uma forma muito geral e sucinta, poder-se-á resumir da seguinte forma as metodologias apresentadas: i) os métodos empíricos são baseados na experiência adquirida ao longo do tempo no

tratamento de casos semelhantes; ii) os modelos matemáticos (métodos analíticos) são mais flexíveis e não tão restritivos a condições de semelhança com casos estudados anteriormente; iii) os métodos semi-analíticos e numéricos agrupam as potencialidades das metodologias analíticas com a eficiência de uma resolução numérica.

O presente trabalho foca-se no estudo da resposta dinâmica do sistema veículo-via-macço recorrendo a metodologias semi-analíticas e numéricas, desenvolvidas por Alves Costa (2011) e que servem de suporte aos estudos a realizar ao longo da presente dissertação.

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Atualmente, uma das grandes preocupações existentes nas linhas de caminho-de-ferro centra-se na questão da redução das tensões transmitidas ao macço da fundação. Estas devem ser reduzidas a um nível aceitável para evitar a rápida degradação da estrutura. O dimensionamento de uma linha férrea é, assim um processo complexo e que ainda está muito dependente de processos empíricos. A avaliação numérica das alterações do estado de tensão que o solo sofre com o tráfego ferroviário é desde logo uma tarefa extremamente importante para uma sistematização de dimensionamento e previsão do comportamento da estrutura a curto/longo prazo. A presente dissertação procura dar um pequeno contributo no aprofundar da percepção dos fenómenos associados a estas alterações.

Desde logo as alterações ocorridas ao nível de um elemento abaixo da linha férrea envolvem a rotação da direção das tensões principais com a passagem do veículo ferroviário. Além da rotação verificada no plano longitudinal (Figura 1.2), as direções de tensão principais também apresentam rotação nos planos transversais, a menos que se esteja a analisar um dado elemento sob o plano de simetria.

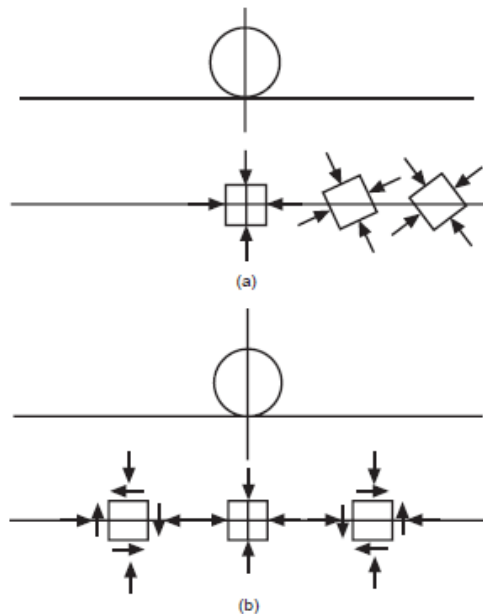


Figura 1.2 – Representação esquemática da rotação da direção das tensões num dado elemento do solo devido à movimentação de um eixo do comboio ao longo do plano longitudinal: a) Representação das tensões principais; b) Representação das tensões normais e tangenciais (Brown, 1996).

O nível de complexidade destes assuntos e as questões técnicas associadas permitem uma melhor compreensão da pertinência da realização de um trabalho desta importância – Dissertação de Mestrado – nesta área e com este tema, requerendo um estudo aprofundado do comportamento de toda a estrutura ferroviária, de modo a salvaguardar eventuais anomalias e prejuízos económicos em posteriores reparações, que poderiam ser evitados, com um conhecimento adequado, logo na fase de construção.

No sentido de avaliar e interpretar as alterações do estado de tensão devidas ao tráfego ferroviário, contribuindo para o aprofundamento do conhecimento nesta área, a presente dissertação, com base numa metodologia de cálculo numérico, desenvolve um conjunto de estudos paramétricos, atendendo à interação dinâmica entre a via-férrea e o maciço de fundação, bem como, ao problema da interação entre o comboio e a via. Estes estudos paramétricos envolvem a avaliação da influência da velocidade de circulação e a posição geométrica dos pontos considerados na análise, sistematizando as alterações e as tendências verificadas.

Procura-se ainda, descrever, ainda que sucintamente, um ensaio laboratorial capaz de simular os ciclos de carga-descarga associados à passagem de um comboio e traduzir a rotação das tensões principais que ocorrem.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

De modo a cumprir os objetivos evidenciados anteriormente, a presente dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos. Após este capítulo introdutório, segue-se o Capítulo 2, onde se apresenta a estrutura de uma via-férrea, classificando-a como estrutura balastrada ou não balastrada. São ainda referidos os vários elementos constituintes de cada uma, com uma descrição geral dos mesmos, e apresentadas as principais vantagens e desvantagens das tipologias estruturais apresentadas.

O Capítulo 3 é dedicado à apresentação do modelo de elementos finitos 2.5D, onde se expõem os conceitos base admitidos na modelação numérica. Apresenta-se estruturado de acordo com o funcionamento global do modelo, onde se separa a modelação da interação via-macício de fundação e a interação dinâmica entre a via-férrea e o material circulante. O capítulo termina com a apresentação de um exemplo reportado na bibliografia da especialidade, procurando realizar-se um estudo preliminar e adquirir sensibilidade no funcionamento do modelo numérico, uma vez que são conhecidos resultados concretos.

No Capítulo 4, o capítulo fulcral da presente dissertação, são apresentados uma série de estudos paramétricos que englobam, numa primeira fase, a consideração de apenas o mecanismo de excitação quasi-estático na avaliação das alterações ao estado de tensão do maciço de fundação. A representação das alterações do estado de tensão sob forma de trajetórias de tensão foi o modo adotado para, de uma forma simples e sintetizada, apresentar as referidas alterações. Posteriormente procede-se à avaliação do grau de influência da interação via-veículo, traduzido no mecanismo de excitação dinâmico, comparativamente ao mecanismo quasi-estático, analisando o efeito da velocidade e da frequência de excitação da carga nos incrementos de tensão ocorridos.

O Capítulo 5 diz respeito à apresentação das principais questões que um ensaio laboratorial deve ser capaz de responder de modo a atender às solicitações cíclicas e alterações distorcionais que a circulação ferroviária induz nos elementos do solo e assim, apresentar um ensaio que permite o controlo das tensões normais e tangenciais, como é o caso do ensaio torsional com cilindro vazado, possibilitando a simulação das alterações ao estado de tensão ocorridas. Por fim, o último capítulo apresenta as conclusões finais retiradas com a realização deste trabalho e sugestões para posteriores investigações/trabalhos nesta área.

2

ESTRUTURA DE UMA VIA-FÉRREA

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A via-férrea pode ser considerada uma estrutura de engenharia composta por um conjunto de camadas, englobando desde o solo natural até ao carril (Brandl, 2004). Apesar desta aparente simplicidade conceptual, esta é uma estrutura de grande complexidade quer a nível de análise quer a nível de interpretação.

A avaliação de uma linha férrea ficará sempre marcada pelo seu desempenho. Os aspetos a que esta terá de responder são pautados por um nível de exigência elevada e enumeram-se de seguida: i) estabilidade; ii) resiliência; iii) ausência de deformações permanentes significativas; iv) pouco desgaste dos elementos; v) minimização do impacto ambiental gerado pela circulação de comboios. (Fortunato, 2005).

Do ponto de vista de conceção estrutural, poder-se-á dividir uma via de caminho-de-ferro em dois sistemas: via balastrada e via não balastrada. A via balastrada é a solução mais tradicional e que vem sendo mais usada em todo o mundo. No entanto, com o desenvolvimento de redes de alta velocidade e de metropolitanos a via não balastrada tem tido um grande incremento.

A grande diferença entre as duas soluções, como o próprio nome indica, resulta da presença ou não da camada de balastro. Esta é uma camada importantíssima na solução tradicional (via balastrada) e na via não balastrada é substituída por uma laje em betão armado, razão pela qual facilita a análise ao seu comportamento através das teorias da Engenharia das Estruturas (Brandl, 2004). Tal facto já não acontece para a via balastrada, onde o seu dimensionamento ainda está muito dependente de regras empíricas, acumuladas ao longo dos mais de 150 anos de existência, sem descurar os avanços ocorridos na última década na consolidação de técnicas mecanicistas (Fortunato, 2005).

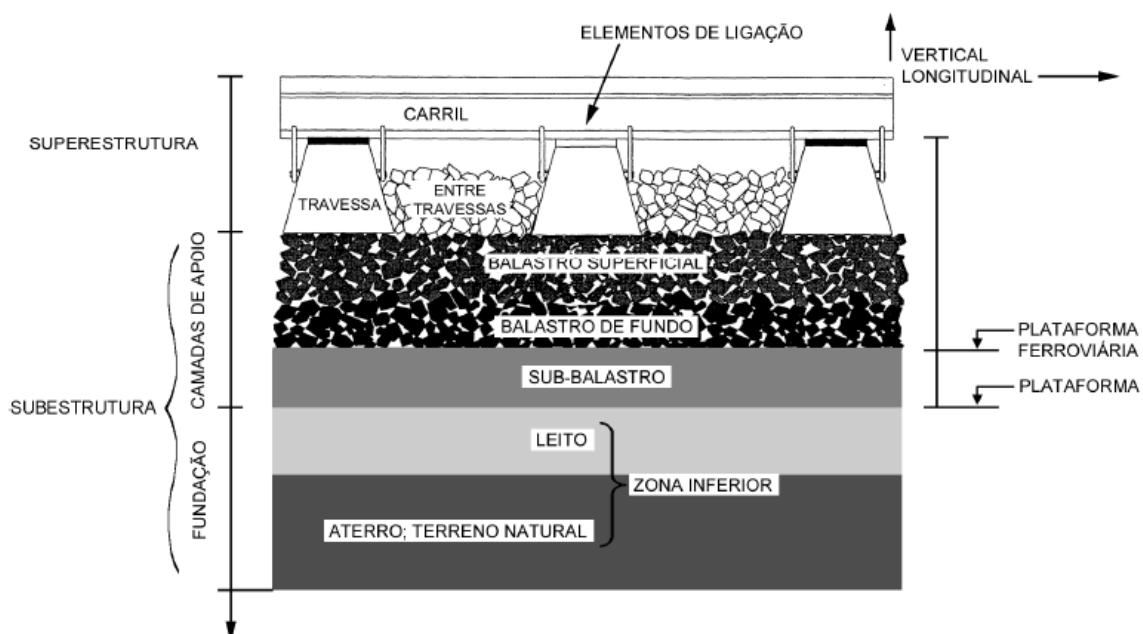
O objetivo de estudo da presente dissertação apenas foca a via balastrada. No entanto, apresenta-se uma descrição generalista da via não balastrada de modo a transmitir as principais características e conceitos base deste tipo de via, a qual tem tido um amplo desenvolvimento nos últimos anos, como já referido.

2.2. VIA-FÉRREA BALASTRADA

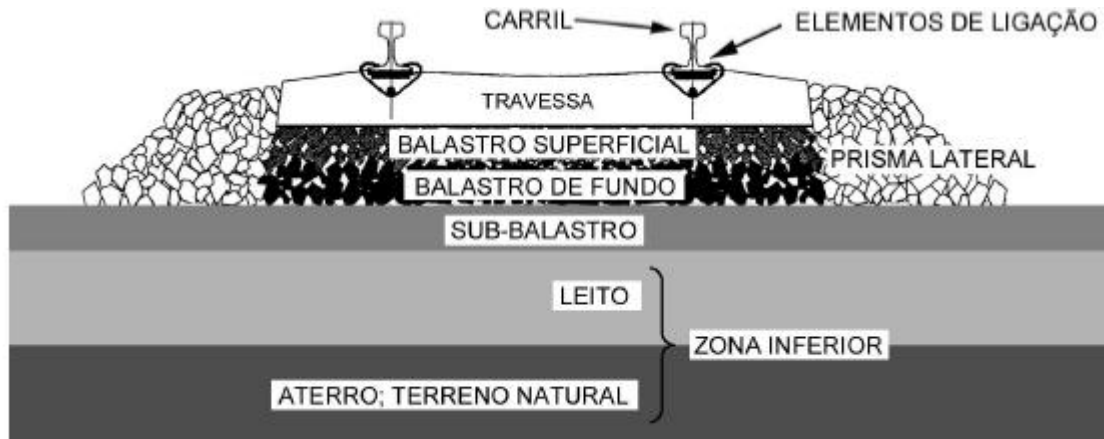
A composição de uma via-férrea balastrada sofreu poucas evoluções ao longo da sua história. A sua estrutura mantém-se praticamente inalterada desde a sua génese. Apesar desta aparente estagnação da conceção estrutural, os métodos de construção e conservação da via alcançaram um elevado nível de desenvolvimento, permitindo o aumento da velocidade de circulação e capacidade de carga transportada em vias deste tipo.

O grau de desenvolvimento alcançado deveu-se primeiramente a melhoramentos ao nível do carril, seguidamente nas travessas utilizadas e por último na subestrutura (Fortunato, 2005). As várias camadas constituintes da via-férrea apresentam uma diminuição do nível de rigidez com a evolução em profundidade. Esta variação está dependente não só das propriedades do material, espessura e grau de compactação de uma dada camada, como também da interação entre camadas adjacentes. Deve procurar-se assim, uma rigidez global que propicie um comportamento adequado da estrutura (Araújo, 2010).

Este tipo de estrutura é normalmente dividida em duas partes: subestrutura e superestrutura. Como se pode observar na Figura 2.1, a superestrutura engloba os carris, as travessas, e os sistemas de fixação. Já a subestrutura é constituída pelo balastro, sub-balastro e pelas camadas da fundação (leito e solo natural). A separação da superestrutura e subestrutura ocorre ao nível da interface travessas-balastro.



a)



b)

Figura 2.1 – Esquema estrutural da via-férrea balastrada: a) perfil longitudinal; b) perfil transversal (Fortunato, 2005).

É de salientar, uma vez mais, que o desempenho da via é influenciado por todo o conjunto de camadas descritas acima pois, durante um longo período de tempo reservou-se uma maior atenção aos aspetos ligados à superestrutura em detrimento da subestrutura, sendo até comum associar-se o desempenho de toda a via unicamente às características que a superestrutura evidenciava. Este modo de interpretação apresentou resultados pouco satisfatórios em diversas situações (Fortunato 2005).

Ainda num contexto geral, pode afirmar-se que os elementos constituintes da superestrutura, bem como o balastro são elementos onde o desgaste é mais pronunciado, devido à passagem do tráfego em contacto mais direto. Já o sub-balastro e a fundação apresentam um período de duração superior, podendo ser da ordem de 50 a 100 anos, desde que os trabalhos relativos à conservação e reabilitação da superestrutura, da subestrutura e do sistema drenagem tenham sido corretamente efetuados (Fortunato, 2005).

Apresentadas as ideias-chave gerais relativamente à via balastrada, segue-se um pequeno resumo das principais características e aspetos relevantes de cada componente constituinte deste tipo de vias-férreas.

2.2.1. CARRIS

Começando pelos carris, estes são elementos longitudinais que têm como principal função “guiar” as rodas do comboio de uma forma uniforme e contínua, sendo por isso um dos elementos fulcrais na via-férrea. Estes devem apresentar uma rigidez suficientemente elevada de modo a funcionarem como vigas e transmitirem as cargas concentradas das rodas para os apoios (geralmente os apoios são as travessas afastadas longitudinalmente entre si, com um dado espaçamento) sem que ocorra uma deformação excessiva.

O material constituinte do carril, a sua rigidez, a inércia da sua secção e o comprimento das barras são propriedades fundamentais no correto funcionamento da estrutura. São estas propriedades que

permitem uma boa distribuição das ações pelas travessas onde estes apoiam e controlam o nível de cargas dinâmicas que são transmitidas à subestrutura, em particular na ocorrência de irregularidades geométricas nas rodas ou no carril.

Como já referido, as irregularidades nos carris são um motivo de preocupação pelas ações dinâmicas que induzem sendo prejudiciais para a durabilidade da via, estruturas circundantes e comodidade dos passageiros. A adoção de carris de barra longa (120 metros) com juntas soldadas minimiza o efeito das irregularidades, devido à inexistência de juntas para efeitos de circulação. Por exemplo, o carril atualmente adotado nas linhas de alta velocidade corresponde a perfis UIC 60 (Figura 2.2) de elevada inércia à flexão, com a especificidade referida anteriormente.



Figura 2.2 – Representação dos perfis UIC60 (Sanzha, 2012).

A principal vantagem da utilização dos carris de barra longa reside no facto de estes conduzirem a uma menor deterioração dos componentes da via, menor oscilação dos veículos e menor produção de vibrações e ruídos, gerando assim, um nível de conforto superior. Contudo, o seu comprimento é propício à geração de esforços internos consideráveis devido às variações térmicas a que se encontra sujeito, torna ainda mais difícil a substituição de elementos na superestrutura e exige um investimento inicial superior (Fortunato, 2005; Selig and Waters, 2004).

2.2.2. SISTEMA DE FIXAÇÃO

Relativamente ao sistema de fixação (Figura 2.3), este é o responsável pela ligação/fixação do carril às travessas. Existem muitas variações deste tipo de sistema e a sua exposição ultrapassa o âmbito desta dissertação. Procura-se neste ponto apenas descrever os aspetos gerais ligados a estes elementos e focar um constituinte em particular, as palmilhas.

O sistema de fixação além de permitir a ligação entre o carril e as travessas têm também a função de resistir aos movimentos verticais, laterais e longitudinais do carril causados principalmente pela passagem das rodas e por variações térmicas (Selig and Waters, 1994).

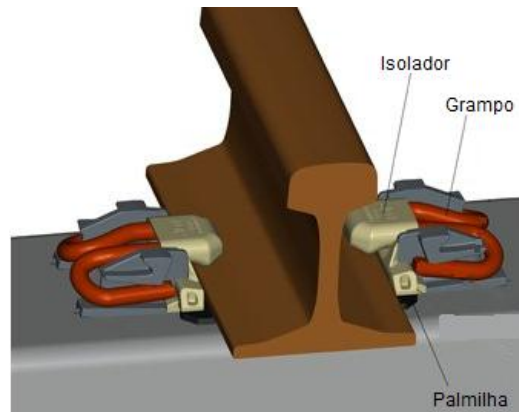


Figura 2.3 – Exemplo tipo de um sistema de fixação (Adaptado de Pandrol Rahee Technologies, 2012).

Nas travessas de betão torna-se necessário a colocação de uns elementos resilientes, denominados de palmilhas, que apresentam, segundo Selig and Waters (1994), as seguintes funções:

- Proporcionar o amortecimento das vibrações induzidas pelo tráfego;
- Reduzir o atrito entre carril/travessa;
- Proporcionar isolamento elétrico para os circuitos da via-férrea.

Existem diversos tipos destes elementos resilientes, onde as características de rigidez apresentam um papel importante na resposta dinâmica da estrutura ferroviária (Figura 2.4). A adoção de uma maior ou menor rigidez acarreta diferentes comportamentos na estrutura. De facto, uma palmilha pouco rígida é responsável por uma maior vibração ao nível do carril, onde a energia transmitida aos níveis inferiores não atinge uma quantidade significativa. Já o contrário se passa para uma palmilha muito rígida, onde grandes quantidades de energia são transmitidas ao balastro e aos níveis subsequentes.

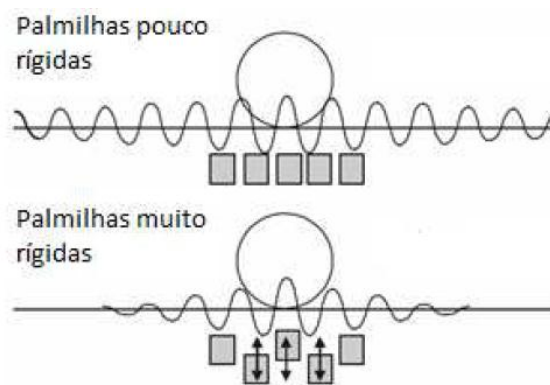


Figura 2.4 – Representação esquemática da influência da rigidez das palmilhas no nível de energia transferido (Alves Costa, 2011).

2.2.3. TRAVESSAS

O apoio discreto dos carris é garantido, como já referido, pelas travessas. Estas transmitem assim, as cargas provenientes dos carris ao balastro. São ainda responsáveis pela manutenção da bitola através do sistema de fixação a si acoplado e garantem quer um alinhamento, quer um nivelamento correto do carril. Para garantir o cumprimento das funções descritas, é necessário que estas apresentem uma adequada resistência e rigidez, quer na direção horizontal quer na vertical.

As travessas são construídas, regra geral, a partir de madeira ou betão armado/pré-esforçado. Ultimamente, principalmente a nível de alta velocidade a escolha recai na utilização de travessas de monobloco de betão pré-esforçado, apresentando estas maiores níveis de rigidez, resistência e durabilidade, comparativamente com as de madeira (Figura 2.5). Contudo, também apresentam algumas desvantagens a levar em conta, tais como: i) maior dificuldade de manuseamento; ii) maior fragilidade; iii) maior dificuldade em manter o nivelamento em plataformas de fraca qualidade; iv) preço mais elevado (Fortunato, 2005).



Figura 2.5 – Exemplos de travessas tipo monobloco em betão e travessas em madeira.

Outro aspeto importante a ter em atenção é o espaçamento das travessas, pois é um fator determinante no funcionamento da via. No entanto, os espaçamentos normalmente utilizados, rondando 0,6 m a 0,65 m, parecem estar devidamente calibrados, não se verificando graves problemas quando aplicados os espaçamentos normalizados (Fortunato, 2005).

2.2.4. BALASTRO

Passando à descrição dos elementos constituintes da subestrutura, o balastro apresenta-se como a primeira camada (Figura 2.6). Esta é composta por material granular, sobre a qual assentam as travessas. O material constituinte desta camada é extremamente importante para o seu desempenho, privilegiando-se o uso de materiais granulares grosseiros, provenientes de rochas duras, como o granito ou basalto.

As principais funções desta camada, para além de servir de apoio às travessas, são as seguintes (Selig and Waters, 1994): i) resistir às forças verticais, laterais e longitudinais aplicadas através das travessas; ii) fornecer alguma resiliência e absorção de vibrações; iii) permitir a absorção de material poluente

proveniente do material circundante; iv) facilitar operações de manutenção; v) permitir a drenagem imediata e de uma forma eficaz; vi) redução das tensões a um nível aceitável para a transferência às camadas inferiores.

A presença desta camada facilita as operações de manutenção da via, mas é também esta camada a que requer maior nível de cuidados de manutenção, que se traduz num grande dispêndio nos custos de manutenção, arrecadando assim, a maior parcela. É esta uma das principais razões que suscitou o aparecimento das vias sem balastro, que serão descritas posteriormente na presente dissertação.



Figura 2.6 – Exemplo da camada de balastro (FERGRUPO, 2012).

2.2.5. SUB-BALASTRO

A camada de sub-balastro é uma camada de transição entre o balastro e o solo da fundação, constituída por material de granulometria extensa. A sua principal função é a contínua redução das tensões motivadas pela passagem do veículo ferroviário até um nível em que o solo da fundação, de piores características mecânicas, possa suportar. Aparentemente esta camada confunde-se com a camada de balastro, pois partilham um objetivo fundamental: a degradação de cargas. No entanto, a camada de sub-balastro é bastante mais económica e mais eficiente do que o acréscimo de espessura que se poderia providenciar para o balastro para a função em causa.

Além da repetida função, a camada de sub-balastro permite evitar misturas das partículas provenientes do solo da fundação com a camada de balastro, que a acontecer poria em causa a eficácia da drenagem conferida pela primeira camada da estrutura, bem como a proteção do solo da fundação das águas superficiais e da ação do gelo.

2.2.6. FUNDAÇÃO

Finalmente, subjacente a todas as camadas e elementos descritos anteriormente, surge a fundação. Esta é constituída por uma parte mais superficial, denominada de leito, onde o solo apresenta características mecânicas superiores, comparativamente à restante parte da fundação.

Esta camada deve ser capaz de servir de apoio a toda a plataforma que se desenvolve sobre si, mantendo-se estável e sem deformações excessivas. No sentido de se obterem melhores características mecânicas, em particular na camada de leito, é possível durante o processo construtivo implementar técnicas que assegurem tais condições. Sem entrar em grandes detalhes, refere-se o processo de compactação e o tratamento do solo recorrendo a ligantes (Figura 2.7) como técnicas de relativa facilidade de aplicação e resultados positivos (Fortunato, 2005).



Figura 2.7 – Tratamento do solo com ligantes (Fortunato, 2005).

2.3. VIA-FÉRREA NÃO BALASTRADA

Ao longo da história das vias férreas inúmeras experiências têm sido realizadas na procura de uma forma adequada e que se revele económica para a estrutura, ou seja, procurando-se encontrar soluções estruturais alternativas de elevada qualidade e baixo custo. Algumas delas revelaram-se atraentes e foram sendo inseridas em troços específicos.

A via não balastrada surge depois duma dessas inúmeras experiências, garantindo um elevado nível de estabilidade na circulação, através de níveis de conforto e segurança adequados às exigências que vigoram nos dias de hoje, sem esquecer os baixos custos despendidos com a conservação comparativamente com a solução apresentada anteriormente. Sem embargo, refira-se que os custos de construção são substancialmente superiores aos verificados em vias balastradas.

As vias-férreas não balastradas, como o próprio nome indica, são estruturas em que a camada de balastro é substituída por uma laje em betão armado, desempenhando, grosso modo, a mesma função. A constituição desta camada, ou melhor, conjunto de camadas é propícia à ocorrência de diversas soluções, o que se comprova facilmente pelas diferentes formas que foram surgindo em diversos países e em diversos contextos (Fortunato, 2005).

Uma solução tipo é ilustrada na Figura 2.8, onde se pode observar a presença de três camadas distintas:

- Camada de agregado não ligado: esta camada é praticamente igual à camada de sub-balastro referida na solução de via balastrada, desempenhando as mesmas funções aí mencionadas;

- Camada tratada com ligante hidráulico: é uma camada intermédia, em termos de posição geométrica e de rigidez, entre a camada de agregados não ligados e a laje de betão armado. Esta contribui para a degradação de cargas que lhe são transmitidas, podendo ser omissa na presença de uma fundação de boa qualidade que assim o permita;
- Laje em betão armado: é o elemento fulcral em toda a estrutura. É a primeira camada a receber as cargas provenientes da circulação dos veículos, e como tal, deve ser capaz de evidenciar uma grande degradação dessas cargas, de modo a que as camadas inferiores, de menor qualidade, sejam submetidas a níveis de tensões aceitáveis. É de salientar que esta deve ser dimensionada de modo adequado pois posteriores trabalhos de manutenção ou substituição apresentam custos muito significativos.

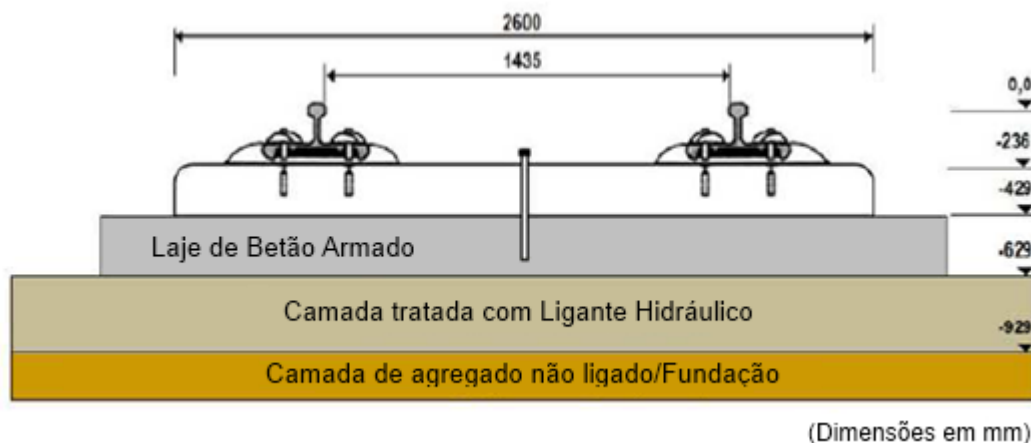


Figura 2.8 – Esquema estrutural do perfil transversal de uma via não balastrada (Adaptado de Alves Costa, 2011).

Relativamente à superestrutura, as maiores diferenças entre as vias balastradas e as não balastradas residem essencialmente ao nível das palmilhas utilizadas. De facto, nas vias sem balastro estas apresentam uma maior flexibilidade de modo a absorver de um modo mais significativo as vibrações associadas à passagem dos veículos, conferindo desse modo, uma maior proteção da camada de betão estrutural da laje.

De um modo geral, não se entrando em grandes detalhes, as principais vantagens associadas às vias não balastradas em comparação com as vias balastradas são as seguintes: i) menores custos de manutenção e menor número de operações de manutenção; ii) rigidez mais homogénea em vias de boa qualidade; iii) grande estabilidade relativamente aos esforços laterais; iv) maior durabilidade.

Embora apresente as vantagens descritas, é importante sublinhar os maiores custos de construção associados, bem como a maior dificuldade em realizar a substituição e manutenção dos restantes elementos da estrutura ferroviária.

A solução de via não balastrada é particularmente adequada em vias onde o tráfego de passageiros e mercadorias assume grande expressão, em vias onde se atinjam elevadas velocidades e em vias onde as cargas aplicadas à via pelos veículos sejam superiores às habituais. Nestas situações face aos elevados custos de manutenção associados a uma via balastrada, a solução de via sem balastro pode ser economicamente competitiva. No entanto, na aplicação destas estruturas em ambiente urbano é

necessário adotar medidas adicionais, pois estas apresentam um nível de absorção de ruídos e vibrações inferior à solução tradicional, causando um maior incômodo para as populações.

3

APRESENTAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS 2.5D

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O estudo e a simulação de problemas relacionados com a propagação de vibrações induzidas pelo tráfego ferroviário é uma tarefa extremamente difícil e complexa. O aspeto tridimensional do problema é um fator decisivo para o aumento da complexidade, não sendo de esquecer o carácter infinito do maciço de fundação na modelação. No entanto, nos últimos anos assinalam-se inúmeros esforços na pesquisa e desenvolvimento de métodos numéricos eficientes e capazes de modelar as estruturas de carácter tridimensional e infinito, sujeitas a carregamentos dinâmicos.

Hoje em dia, do ponto de vista teórico e conceptual, os pressupostos para a utilização de modelos e métodos de cálculo numérico e analítico estão estabelecidos. Os métodos numéricos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF) ou no Método dos Elementos de Contorno (MEC) são poderosas ferramentas que possibilitam a análise do mais variado tipo de problemas de Engenharia. Apesar da aparente universalidade de aplicação destes métodos, por vezes a sua aplicação fica condicionada pelo custo computacional requerido. A existência de problemas, principalmente no domínio tridimensional, com milhares, e até milhões, de graus de liberdade requer o uso de computadores de grande capacidade de cálculo para a obtenção de resultados em tempo útil. A não existência destas estruturas computacionais facilmente acessíveis requer a simplificação do problema (Alves Costa, 2011).

Para estruturas invariantes e infinitas em pelo menos uma direção, um problema tridimensional pode ser modelado de uma forma 2.5D, ou seja, procede-se a uma discretização numérica da secção transversal, combinada com a aplicação de transformadas de Fourier em relação à variável tempo e espaço na direção longitudinal. Esta combinação de procedimentos permite obter a resposta tridimensional do problema com um esforço computacional associado a uma análise bidimensional, repetida para diferentes números de onda/frequências.

Para se obter um modelo completo e geral para a análise das alterações geomecânicas induzidas pela ação do tráfego ferroviário é necessário atender à interação dinâmica que se verifica entre o material circulante e a via-férrea, bem como a que se verifica entre a via e o maciço de fundação. Para uma maior facilidade de cálculo é conveniente dotar o modelo geral de dois módulos onde cada um deles

englobe a interação ao nível das várias componentes referidas. Estes módulos devem ter a versatilidade de poderem ser desacoplados e analisados individualmente, e assim conferirem um poder de reanálise de resultados de uma forma muito mais rápida. O esquema que se apresenta na Figura 3.1 é bastante elucidativo da forma de interação entre os módulos referidos.

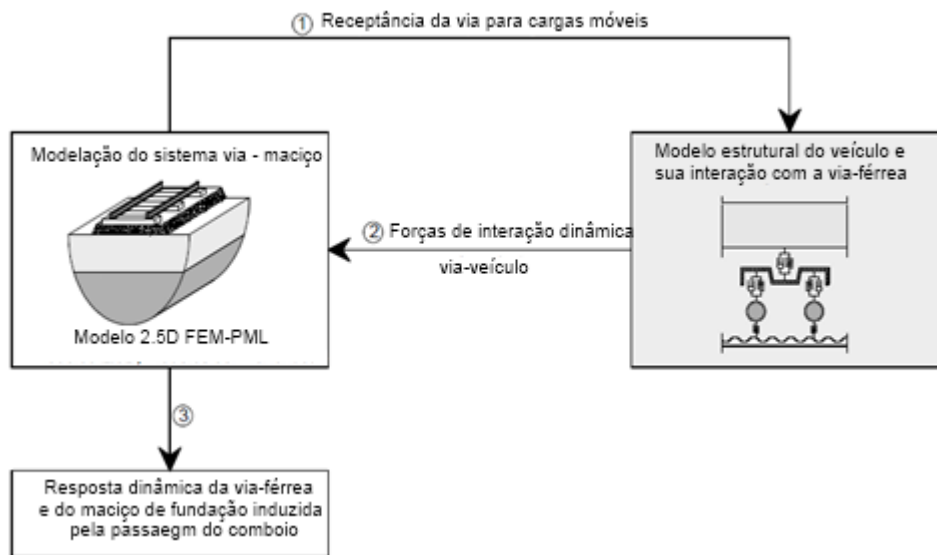


Figura 3.1 – Fluxograma representativo da interação entre os vários módulos do modelo de cálculo proposto (Adaptado de Alves Costa, 2011).

No que diz respeito à modelação do sistema via-macício é conveniente referir desde já que as estruturas ferroviárias, excetuando zonas particulares, como por exemplo, curvas de pequeno raio e zonas de transição aterro-obras de arte, podem ser admitidas como infinitas na direção longitudinal. A Figura 3.2 mostra o carácter infinito e retilíneo da estrutura referido. Além da condição referida, é ainda necessário que as propriedades geométricas e mecânicas nesta direção apresentem um carácter invariante de modo a que, uma dada secção modelada consiga representar toda a extensão da estrutura. Sem embargo, a presença de travessas na via-férrea traduz-se numa periodicidade na direção de desenvolvimento da via em função da distância entre elas, o que leva a que seja necessário proceder a determinados ajustes de modo a possibilitar a modelação 2.5D. Esta questão será discutida mais adiante, ficando desde já expressa a condição necessária para a aplicação do modelo 2.5D a este sistema.



Figura 3.2 – Caráter infinito e retilíneo da via-férrea (Alves Costa, 2011).

Diversos estudos sobre a aplicação desta formulação a modelos baseados no MEF têm sido desenvolvidos em diferentes meios e muitos deles com validação experimental e resultados muito satisfatórios. Refira-se como exemplo os trabalhos de Lombaert *et al* (2006), Alves Costa *et al* (2011), entre outros, sendo que o primeiro trabalho com base num modelo 2.5D com carregamento móvel data de 2001 e foi desenvolvido por Yang e Hung (2001).

No que diz respeito à modelação da interação dinâmica entre o comboio e a via, adotou-se um modelo independente, como já referido, e apresenta um conjunto de simplificações que permitem uma redução da complexidade do problema e que são aceites pela generalidade da comunidade técnica que se debruça sobre esta área.

As simplificações referidas ocorrem ao nível do comportamento, que se assume linear, não se levando em conta as perdas de contacto entre as rodas e o carril e o comportamento não linear de alguns materiais. Outra grande simplificação reside no facto de se considerar apenas as forças dinâmicas de direção vertical que se geram devido à interação do veículo com a via, conforme discutido com maior pormenor no decorrer do presente capítulo (Alves Costa, 2011).

Relativamente à organização deste capítulo, inicialmente serão apresentados os traços gerais do modelo numérico 2.5D baseado no MEF usado na modelação do sistema via-macício de fundação, seguindo-se a apresentação dos aspetos ligados à modelação da interação entre a via e o comboio. Estes modelos foram desenvolvidos por Alves Costa *et al* (2010; 2011; 2012a) na plataforma MatLab 2009. Por fim, o capítulo é terminado com a apresentação, modelação e análise de resultados de um exemplo documentado na bibliografia, servindo de teste de validação os resultados obtidos com o modelo numérico.

3.2. TRAÇOS GERAIS DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS 2.5D NA MODELAÇÃO DA INTERAÇÃO VIA-MACIÇO DE FUNDAÇÃO

3.2.1. PRINCÍPIO BASE

Como já referido, o método numérico engloba a aplicação do método dos elementos finitos na modelação da secção transversal e a introdução de uma transformada de Fourier aplicada na direção

longitudinal do desenvolvimento da via-férrea permitindo, deste modo, a resolução de um problema tridimensional com um esforço computacional apropriado. Uma forma esquemática da sequência de passos realizados ao longo de todo o processo de cálculo, pode ser visualizada na Figura 3.3, conforme apresentado em Alves Costa (2011).

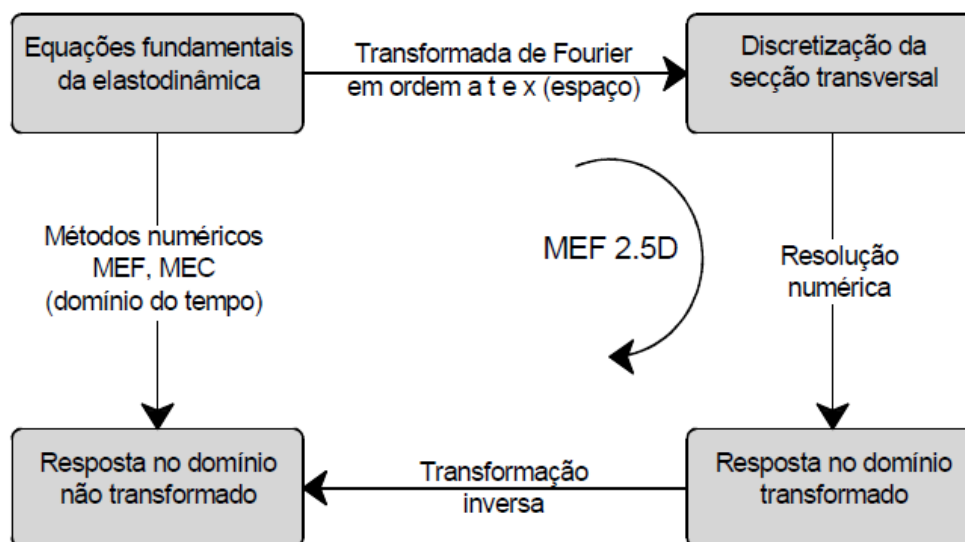


Figura 3.3 – Sequência dos principais passos da aplicação do método de elementos finitos 2.5D (Alves Costa, 2011).

A aplicação da Transformada de Fourier ao domínio espaço-tempo, passando a trabalhar-se no domínio número de onda-frequência, facilita as sucessivas derivações que se terão de efetuar na resolução numérica, pois estas no domínio do número de onda são facilmente resolvidas analiticamente, por se tratar de uma sucessão de funções trigonométricas. Solucionado o problema no domínio do número de onda-frequência, os resultados são retornados ao domínio espaço-tempo através de transformadas de Fourier inversas. O processo que acaba de ser descrito é a chave do método, mas tudo começa na formulação das equações fundamentais da elastodinâmica, que por uma questão de simplificação não serão apresentadas na presente dissertação, até porque não é um dos objetivos a alcançar. No entanto, se for do interesse do leitor recomenda-se a leitura de Alves Costa (2011).

Apresentado o princípio base do método em estudo, as secções que se seguem procuram sintetizar aspetos específicos na formulação do método, como alguns pressupostos admitidos e a forma de modelação das várias componentes do sistema via-macizo.

3.2.2. ANÁLISE ELÁSTICA

O comportamento do maciço da fundação assume-se no domínio das pequenas deformações na análise à geração e propagação de ondas vibratórias induzidas pela passagem do comboio. Esta verificação pode traduzir-se pelo estudo do problema no domínio da elasticidade. Esta hipótese é assumida na generalidade dos casos estudados por diversos autores. Além desta evidência, a consideração de modelos de cálculo que englobem a não linearidade do sistema implica a necessidade de realização de ensaios complexos na caracterização dos vários parâmetros intervenientes bem como, um maior custo

computacional para a sua realização. Contudo, em situações extremas, como a circulação dos veículos a velocidades próximas da propagação das ondas sísmicas no solo, os níveis de deformação serão mais acentuados o que poderá motivar a uma análise elástica equivalente, ou seja, a uma degradação das características mecânicas em função do nível de distorção a que o solo esteja sujeito. (Alves Costa *et al*, 2010).

Com base na experiência adquirida por diversos autores nesta área de estudo, pode-se afirmar que se verifica sempre a ocorrência de dissipação de alguma energia, mesmo para níveis de distorções do solo muito baixos, pelo que se justifica a adoção de modelos visco elásticos lineares. Estes modelos caracterizam-se pela adoção de três parâmetros fundamentais:

- Módulo de distorção, G_0 ;
- Coeficiente de Poisson, ν ;
- Coeficiente de amortecimento, ξ .

Para terminar, refira-se que o nível de distorção associado a um modelo com comportamento visco elástico linear se encontra na gama de 10^{-6} a 10^{-5} . Quando o nível de distorção se encontra entre 10^{-4} a 10^{-3} o solo começa a evidenciar comportamento elasto-plástico, sendo recorrente a adoção de modelos visco elásticos lineares equivalentes, o que implica a diminuição da rigidez e o aumento do amortecimento.

3.2.3. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

A linearidade do presente método permite que se possa abordar o problema com base em funções de transferência, ou seja, é possível obter a resposta de uma qualquer grandeza para uma qualquer ação, desde que tenha o conhecimento prévio da função de transferência, $\tilde{H}_T(k_1, \bar{\omega})$.

A Equação (3.1) traduz precisamente esse princípio, podendo-se apresentar como analogia a consideração de um diagrama de carga unitário da teoria das estruturas que, depois de construído, facilmente se pode obter o diagrama para um qualquer valor de carregamento aplicado.

$$\tilde{R}(k_1, \bar{\omega}) = \tilde{H}_T(k_1, \bar{\omega}) * \tilde{P}(k_1, \bar{\omega}) \quad (3.1)$$

onde: $\tilde{R}(k_1, \bar{\omega})$ representa a resposta no domínio transformado, $\tilde{H}_T(k_1, \bar{\omega})$ é a função transferência e $\tilde{P}(k_1, \bar{\omega})$ representa a ação no domínio transformado; k_1 representa a imagem de Fourier da direção espacial de movimento da ação e $\bar{\omega}$ é a imagem de Fourier da variável temporal (Alves Costa *et al*, 2008).

Trata-se portanto de um método de análise no domínio transformado, onde a função de transferência está apenas dependente das propriedades do maciço e da via, sendo exibida através de um espectro função do número de onda e da frequência (Alves Costa *et al*, 2008). A adoção desta metodologia permite uma economia de tempo, uma vez que os cálculos de elevado esforço computacional e, por consequente, grandes períodos de tempo de cálculo despendidos, só necessitam de ser efetuados uma única vez, podendo ser utilizados para diferentes carregamentos.

3.2.4. EXIGÊNCIAS DE DISCRETIZAÇÃO NA MODELAÇÃO

De modo a reduzir o esforço computacional, é de todo o interesse a redução dos graus de liberdade na resolução do problema. Este objetivo é atingido considerando a discretização do menor domínio possível e as maiores dimensões possíveis para os elementos finitos, tendo sempre presente que estas imposições terão de ser compatíveis com as exigências de sensibilidade do modelo.

Para a obtenção do objetivo anterior, levando em conta as recomendações de compatibilidade com a precisão numérica a alcançar, é conveniente seguir os seguintes princípios na elaboração da malha de elementos finitos:

- As dimensões máximas dos elementos finitos deverão ser compatíveis com o menor comprimentos de onda que se deseja simular. A regra que atualmente se segue aponta para a consideração da dimensão máxima dos elementos finitos próxima a $1/6$ do comprimento de onda a simular (Alves Costa, 2011).
- A dimensão da secção transversal a utilizar inicialmente deve ser suficientemente elevada de modo a não interferir com a solução obtida. A redução da mesma é possível mediante a elaboração de estudos de sensibilidade que permitam concluir que a precisão dos resultados alcançados é compatível com o objetivo pretendido.

3.2.5. MODELAÇÃO DO CARRIL E PALMILHAS

A modelação dos carris é realizada à custa de uma formulação semi-analítica com base na teoria dos elementos de viga de Bernoulli-Euler. A simplicidade de formulação destes elementos é notável, sendo que apenas dois parâmetros são necessários para a sua simulação:

- Rigidez de flexão, EI_r ;
- Massa por unidade de comprimento, m_r .

No que se refere às palmilhas, estas fazem a ligação entre o carril e os restantes elementos, sendo simuladas a partir do conjunto mola-amortecedor com o intuito de simular a rigidez e o amortecimento conferidos por estes elementos.

Na modelação realizada destes dois componentes são ainda efetuadas duas simplificações adicionais, sem que no entanto seja posta em causa o seu comportamento mecânico:

- Ligação carril-travessa suposta contínua;
- Único grau de liberdade corresponde ao deslocamento vertical do carril.

A Figura 3.4 sugere a representação esquemática dos elementos carril-palmilhas.

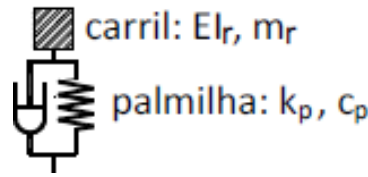


Figura 3.4 – Representação esquemática do carril e palmilha.

3.2.6. MODELAÇÃO DAS TRAVESSAS

Recorde-se que o método que se vem a descrever tem como uma das condições principais da sua aplicabilidade a necessidade de a estrutura ter um carácter invariante na direção longitudinal. Ora, nas vias férreas balastradas, essa condição não é verificada pois as travessas apresentam um carácter periódico. Assim, no presente método, esta questão é contornada com a consideração de uma formulação contínua equivalente. A simplificação efetuada foi devidamente testada em Alves Costa *et al* (2010) e Alves Costa (2011) e os resultados obtidos apresentaram melhorias significativas faces aos demais modelos existentes.

Os elementos finitos que constituem a travessa apresentam uma lei constitutiva que os define como se se tratassem de elementos ortotrópicos. No plano transversal são utilizadas as propriedades mecânicas das travessas, considerando-se um comportamento elástico das mesmas. Na direção longitudinal, uma vez que no espaço entre travessas o material existente é o constituinte da camada de balastro, a rigidez do meio é considerada igual ao módulo de Young desse material. Assim, as propriedades no plano transversal (plano yz) são definidas pelo módulo de Young E_k e coeficiente de Poisson ν_{kk} , onde k representa a direção y ou z desse plano, vindo ainda definido o módulo de distorção de forma implícita através da Equação (3.2).

$$G_{kk} = \frac{E_k}{2(1 + \nu_{kk})} \quad (3.2)$$

Na direção longitudinal (direção x), a lei constitutiva é composta pelo módulo de Young E_x , o coeficiente de Poisson ν_{xk} e o módulo de distorção G_{xk} . Para além das características distintas nas duas direções referidas, há ainda a considerar as propriedades correspondentes à massa em kg/m^3 equivalente da travessa e o seu coeficiente de amortecimento.

3.2.7. MODELAÇÃO DO BALASTRO, SUB-BALASTRO E FUNDAÇÃO

O balastro, sub-balastro e maciço da fundação são modelados através de uma malha de porções finitas, sendo estabelecidas as equações de equilíbrio, admitindo-se, como já referido anteriormente, o comportamento elástico linear e isotrópico na sua formulação. Assim sendo, os parâmetros geomecânicos caracterizadores dos elementos finitos gerados são os seguintes:

- Módulo de Young, E;
- Coeficiente de Poisson, ν ;

- Amortecimento, ξ ;
- Massa volúmica, ρ ;

A grande problemática que se coloca na modelação destes elementos está no carácter infinito da fundação, relativamente às dimensões do modelo a discretizar. Assim, é necessários adotar medidas adicionais na truncatura do domínio. O problema coloca-se precisamente nessa delimitação do domínio, uma vez que estando-se perante a presença de problemas dinâmicos, a inserção de condições fronteira provoca a reflexão das ondas sísmicas que se propagam, com consequências para a qualidade dos resultados obtidos. Numa analogia com problemas estáticos, facilmente se percebe que esta questão não tem interesse desde que a truncatura do domínio e a inserção das respetivas condições de apoio, seja realizada a uma distância suficiente para não influenciar os resultados.

Nos casos que envolvem problemas dinâmicos é necessário a introdução de fronteiras artificiais que possibilitem a limitação do domínio e que, ao mesmo tempo, evitem espúria das ondas que atingem o limite do domínio de interesse. Existem várias técnicas de carácter local correntemente utilizadas na resolução destas questões, salientando-se o método das fronteiras absorventes, o método dos elementos infinitos e o dos estratos absorventes, remetendo-se o leitor interessado em tais matérias para a mais variada bibliografia existente, como por exemplo, Alves Costa (2011), Cemal Genes & Kocak (2004), Astley (2000), White *et al* (1977) e Kontoe *et al* (2008).

Apesar de os métodos referidos apresentarem um amplo desenvolvimento, o método de tratamento das fronteiras a que se dará especial destaque reside numa outra metodologia, que se pode inserir no método dos estratos absorventes, muito recentemente implementada neste tipo de problemas e que tem revelado muito bons resultados (Lopes *et al*, 2012). Esta metodologia é baseada nos estratos de correspondência perfeita (*Perfect Matched Layers – PML's*). As grandes vantagens na utilização destas condições fronteira residem no facto de as ondas poderem atingir a fronteira com um qualquer ângulo de incidência e com um qualquer comprimento de onda, sendo totalmente absorvidas. O algoritmo matemático, que está por detrás deste método, adapta-se de uma forma automática a qualquer comprimento de onda que incida nessa fronteira, ou seja, a absorção é conseguida através do alongamento das coordenadas (no presente caso y e z) para um domínio complexo, o que induz um aumento artificial na atenuação da onda que se propaga ao longo da PML, como é realçado na Figura 3.5.

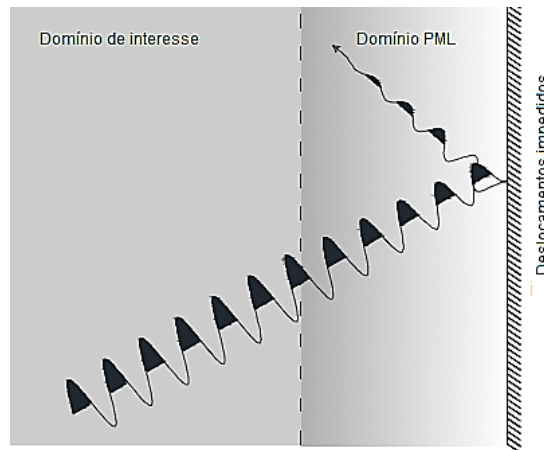


Figura 3.5 – Representação esquemática da atenuação da onda ao incidir no PML (Adaptado de Lopes et al, 2012)

A presente dissertação não se alongará mais na descrição desta metodologia, remetendo-se o leitor interessado para Barbosa *et al* (2011) e Lopes *et al* (2012) onde se pode encontrar informação adicional com o nível de desenvolvimento adequado.

3.3. MODELAÇÃO DA INTERAÇÃO COMBOIO-VIA

3.3.1. MECANISMOS DE EXCITAÇÃO

Antes de serem apresentados os conceitos gerais que estão na base no modelo estrutural do veículo e a sua interação com a via-férrea adotado, convém esclarecer os mecanismos de excitação dinâmica que serão abordados e apresentar uma breve descrição dos mesmos.

A passagem de um comboio origina uma ação com componentes verticais, longitudinais e transversais. Estas forças têm um carácter dinâmico e podem ser obtidas pela sobreposição de dois mecanismos de excitação dinâmica principais: i) mecanismo quasi-estático; ii) mecanismo dinâmico. No modelo adotado, só se tem em conta a componente vertical das ações geradas pela passagem do comboio, não sendo consideradas as restantes componentes (nem com as ações de índole térmica que se podem desenvolver).

No que diz respeito ao mecanismo de excitação quasi-estática, este é originado pelas cargas de valor constante que representam o peso do comboio por eixo, devendo-se o carácter dinâmico do mecanismo de excitação à variação temporal originada nos campos de tensão e deformação, em relação a um ponto fixo do domínio. A não geração de forças de inércia ao nível do veículo deve-se ao facto de o campo de deformações acompanhar a posição das cargas ao longo do tempo. As frequências associadas a este mecanismo são sempre relativamente baixas, estando associadas à velocidade de circulação e à geometria do veículo (Alves Costa, 2011).

Relativamente ao segundo mecanismo de excitação referido, este ocorre devido à interação dinâmica entre o comboio e a via, dando origem a forças de inércia ao nível do veículo em virtude das acelerações sofridas por este. Os principais fatores que contribuem para as referidas forças de inércia

são os seguintes: i) irregularidades da via-férrea e das próprias rodas; ii) descontinuidades da via; iii) diferenças de rigidez da via ao longo do seu desenvolvimento longitudinal. O conteúdo em frequência e intensidade das forças de interação dinâmica descritas são diretamente dependentes da velocidade de circulação do veículo e das suas propriedades dinâmica, bem como das da estrutura ferroviária (Alves Costa, 2011).

Em termos de magnitude dos mecanismos de excitação referidos, pode-se desde já adiantar que, regra geral, a grandeza da excitação quasi-estática é bastante superior à verificada para o mecanismo dinâmico. Apesar desta realidade, o contributo da última é extremamente relevante na geração de vibrações que se propagam ao longo do maciço de fundação (Alves Costa, 2011).

3.3.2. PRINCÍPIO BASE NA MODELAÇÃO

Quando considerado apenas o mecanismo de excitação quasi-estático não se verifica nenhuma interação dinâmica entre o veículo e a via, sendo a análise da propagação de vibrações facilitada. Em contrapartida, quando considerado o mecanismo de excitação dinâmica, desenvolvido devido às condicionantes anteriormente inumeradas, a interação dinâmica veículo-via começa a verificar-se, aumentando consideravelmente o grau de dificuldade na sua análise.

Para a modelação da interação veículo-via é necessário que o contacto roda-carril, em todos os eixos, obedeça a determinadas restrições. Considerando um sistema linear e atendendo exclusivamente às imperfeições geométricas da via, a compatibilidade de deslocamentos entre os pontos de contacto roda-carril é dada pela seguinte equação:

$$u_{roda,i}(t) = u_{carril}(x = ct + a_i, t) + \Delta u\left(t + \frac{a_i}{c}\right) + \Delta y_i(t) \quad \forall i = 1 \dots n \quad (3.3)$$

Onde $u_{roda,i}$ representa o deslocamento de cada ponto de contacto do veículo, u_{carril} diz respeito ao deslocamento do ponto de contacto da via (carril), Δu é a irregularidade geométrica associada à posição da roda i e o termo Δy refere-se ao incremento de deslocamento devido à deformação de contacto roda-carril, induzido pela ação dinâmica. A variável c é a velocidade de circulação do comboio e a_i é a posição da roda i no instante $t=0s$.

Para além da compatibilidade dos deslocamentos nos pontos de contacto roda-carril é necessário atender às forças de interação dinâmicas que se geram. A expressão (3.4) traduz as forças de interação dinâmica no domínio da frequência, definidas por $N_1(\Omega)$, $N_2(\Omega)$, ..., $N_n(\Omega)$, onde o índice $i=1, 2, \dots, n$ faz a correspondência com o respetivo eixo.

$$N_i(\Omega) = -[F(\Omega) + F^H(\Omega) + A(\Omega)]^{-1} \Delta u(\Omega) \quad \forall i = 1 \dots n \quad (3.4)$$

sendo F a matriz de receptância do veículo traduzida pela expressão (3.5), F^H a matriz de flexibilidade de contacto dada pela expressão (3.6) e A a matriz que representa a resposta dinâmica da via face à força dinâmica que é gerada pela irregularidade, conforme a expressão (3.7).

$$[F(\Omega)] = [Z]([k^V] - \Omega^2[M^V])^{-1}[Z]^T \quad (3.5)$$

$$F_{ij}^H = \frac{1}{2kh_i} \delta_{ij} \quad (3.6)$$

$$A_{ij}(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} u_c^G(k_1, \omega = \Omega - k_1 c) \cdot e^{i(a_i - a_j)k_1} dk_1 \quad (3.7)$$

onde $[k^V]$ representa a matriz de rigidez, $[M^V]$ corresponde à matriz de massa do veículo, $[Z]$ é uma matriz constante, kh_i é a rigidez hertziana de contacto roda-carril, δ_{ij} é a deformação no contacto roda-carril e u_c^G refere-se ao deslocamento do carril no domínio transformado.

As forças de interação dinâmica referidas são tratadas no domínio transformado à custa da expressão (3.8) que se segue:

$$\tilde{P}(k_1, \Omega) = e^{-iak_1} N(\Omega) \quad (3.8)$$

3.4. ESTUDO PRELIMINAR

3.4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O modelo numérico acabado de descrever constitui uma ferramenta extremamente valiosa na interpretação da resposta dinâmica associada ao movimento de um dado carregamento. No entanto, tal interpretação é de extrema dificuldade e é conveniente a realização de um estudo preliminar, baseado se possível, em exemplos documentados.

Face ao exposto, procedeu-se ao estudo de um caso muito simples, documentado no artigo intitulado “Characteristics of stresses and settlement of ground induced by train” da autoria de Chen *et al* (2005), para posterior comparação e reflexão sobre os resultados obtidos.

A realização desta primeira análise, referente às alterações ao estado de tensão provocadas pela simulação da passagem de um carregamento móvel, permitirá dotar o autor de competências superiores nesta área, necessárias para proceder a uma análise em problemas de maior realismo, como o caso da simulação da passagem de tráfego ferroviário. Este ganho de competências deve-se refletir na correta abordagem a efetuar ao problema e numa capacidade crítica para com os resultados obtidos.

3.4.2. DESCRIÇÃO DO MODELO FÍSICO E MODELAÇÃO NUMÉRICA

Na proposta dos autores, de modo a estudar a evolução do estado de tensão, o sistema constituído pela estrutura onde circula a carga e a fundação foi, simplificadamente, modelado como se tratasse de uma viga assente sobre um meio semi-indefinido.

Assim, no sentido de modelar essa mesma estrutura, foi adotada a secção transversal do modelo conforme representada na Figura 3.6. A construção da malha de elementos finitos segue as indicações referidas anteriormente.

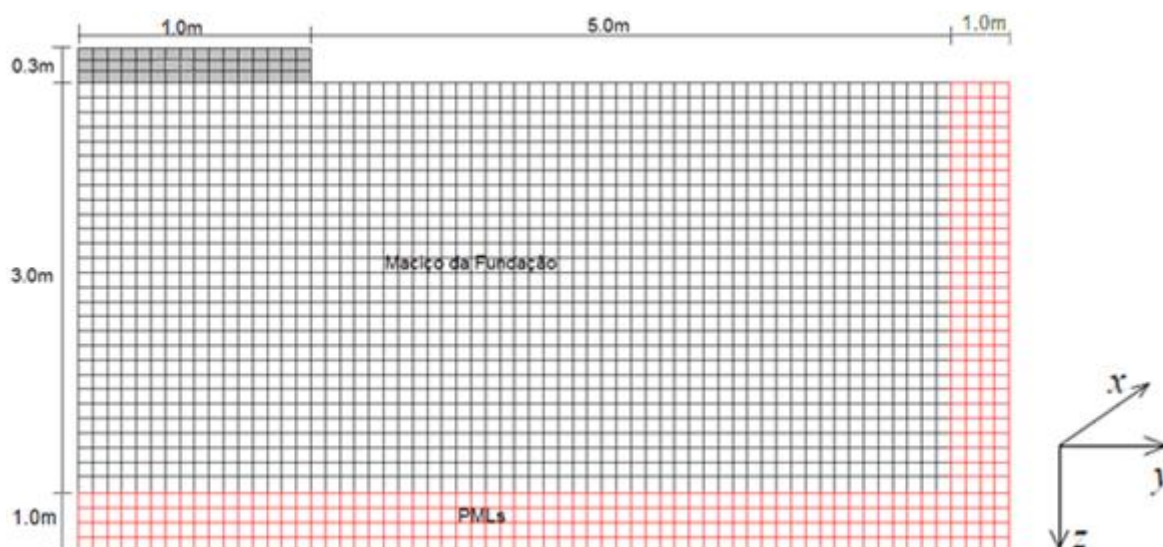


Figura 3.6 – Malha de elementos finitos 2.5D adotada no estudo em causa.

Relativamente às dimensões geométricas, pode-se dizer que a parte superior é um elemento mais rígido, com largura de quatro metros ($a=2$ m) e altura de trinta centímetros ($b=0.3$ m). A fundação, correspondente a um meio semi-indefinido, foi modelada com uma largura total de catorze metros ($L=14$ m) e altura de três metros ($H=3$ m). Tirou-se ainda partido da simetria existente, modelando-se apenas metade da estrutura. As fronteiras do problema foram modeladas recorrendo à metodologia de PML's referida anteriormente.

No que diz respeito às propriedades dos materiais constituintes da viga e do maciço de fundação, estas estão sintetizadas no Quadro 3.1. Convém ainda referir que foi considerado um coeficiente de amortecimento muito baixo (0,1%), pois na proposta em comparação, não era considerado qualquer amortecimento e o modelo numérico assim o exige.

Quadro 3.1 – Propriedades geomecânicas.

	Viga	Fundação
Massa volúmica, ρ [kg/m ³]	1900	1800
Módulo de Elasticidade, E [MPa]	30000	-
Módulo de Distorção, G [MPa]	-	10
Coeficiente de Poisson, ν	0,15	0,45
Velocidade das ondas S, V_s [m/s]	-	74,54
Amortecimento, ξ	0,001	0,001

Resta referir que o sistema de carregamento consiste na aplicação de uma carga concentrada, $P_0=160\text{kN}$, sobre a viga, ao longo do seu plano de simetria, que se desloca a uma velocidade constante e de valor igual a 30 m/s (Figura 3.7).

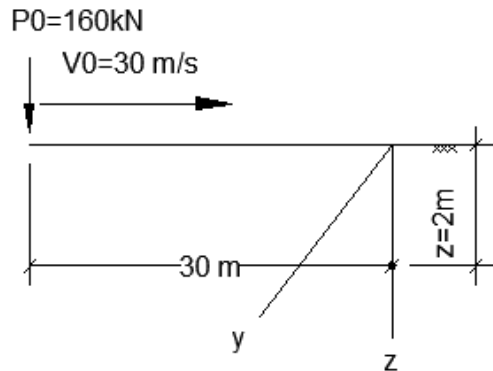


Figura 3.7 – Representação em corte do problema.

3.4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados seguidamente apresentados referem-se ao elemento de solo situado no plano de simetria, a uma profundidade de dois metros, relativamente à superfície do maciço de fundação, tal como indicado na Figura 3.8.

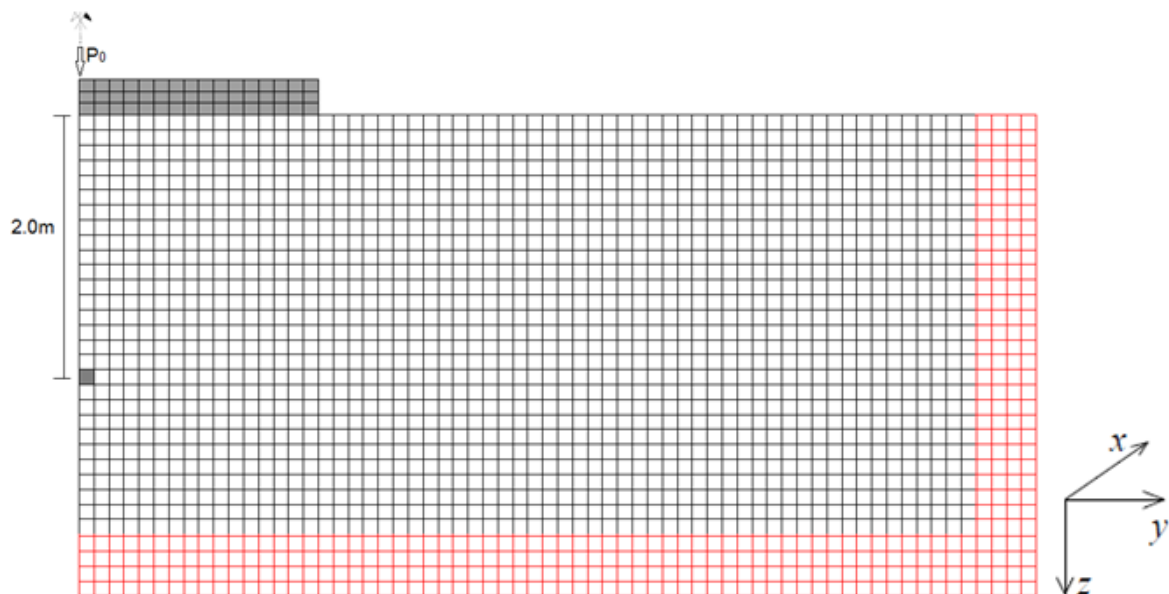


Figura 3.8 – Representação geométrica do elemento do solo em análise.

Dada a localização deste ponto, sob o eixo de simetria, as tensões tangenciais τ_{xy} e τ_{yz} são nulas, ou seja, este elemento de solo não sofre distorções nos referidos planos devido ao movimento da carga, sendo a tensão normal σ_y sempre uma tensão principal. Há ainda a referir que para o instante tempo

$t=0$ s a carga concentrada se encontra a uma distância de 30 metros relativamente ao elemento de solo referido.

A Figura 3.9 exibe a evolução do estado de tensão, em função da distância da carga à secção de referência, devido ao efeito dinâmico da movimentação da carga, representando-se as várias componentes representativas do estado de tensão.

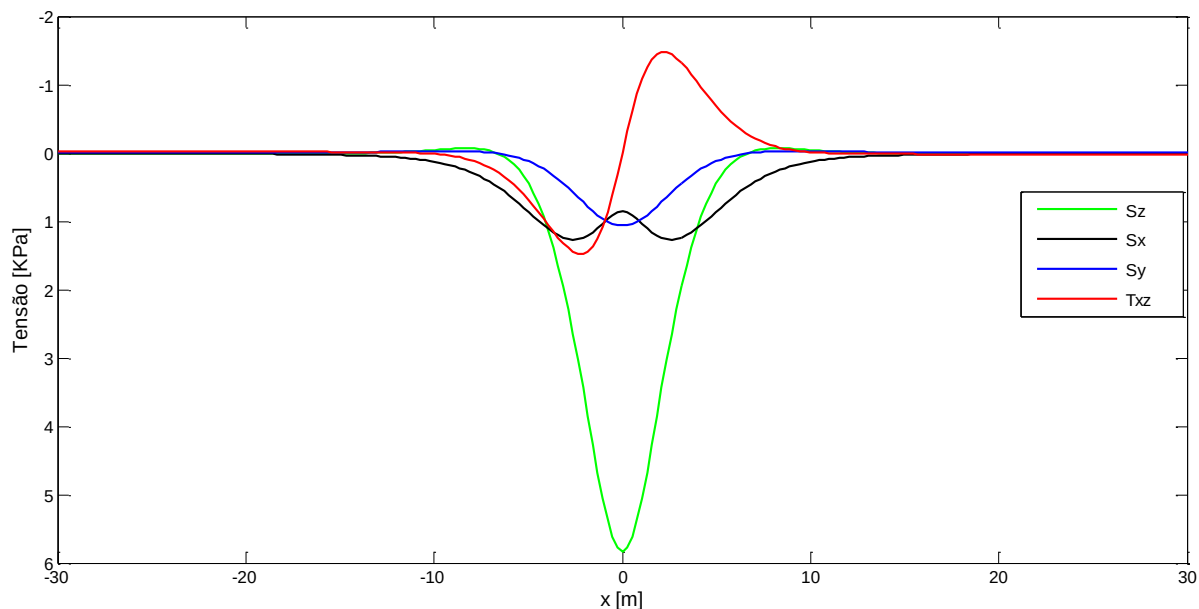


Figura 3.9 – Evolução do estado de tensão induzidas pelo movimento da carga.

Como se pode observar a tensão tangencial τ_{xz} apresenta sinal positivo quando a carga se aproxima do ponto em estudo, sendo nula no instante em que atinge esse ponto, e passa a negativa à medida que a carga se afasta. Esta mudança de sinal verificada vem de encontro ao que é expectável, ou seja, há uma mudança no sentido da distorção que o elemento do solo sofre, nos períodos referidos. A Figura 3.10 traduz exatamente as mudanças no ângulo que a tensão principal σ_1 apresenta com o movimento da carga ao longo do eixo do x, conforme Chen *et al* (2005).

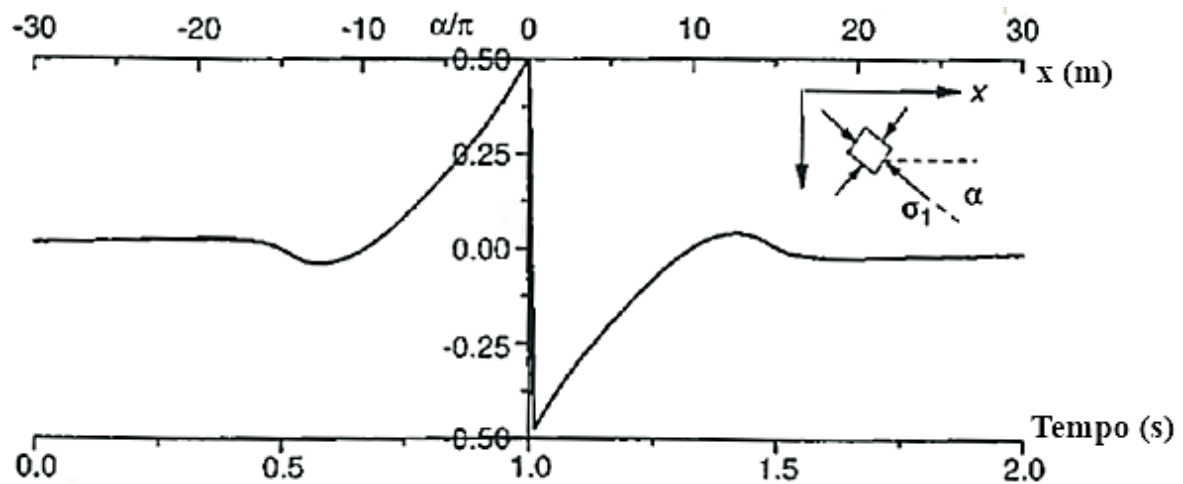


Figura 3.10 – Evolução do ângulo das direções principais de tensão com o movimento da carga (Adaptado de Chen *et al*, 2005).

O sinal atribuído ao ângulo segue a notação de positivo quando a tensão principal σ_1 roda no sentido dos ponteiros do relógio e negativo em caso contrário. O valor do ângulo varia entre $-\pi/2$ a $\pi/2$, sendo que, na referida figura, se encontra normalizado, estando dividido pelo valor de π . Note-se ainda, que se está a considerar um estado de tensão inicial hidrostático ($K_0=1$) e assim, a rotação dos eixos das tensões principais é apenas dependente das tensões dinâmicas induzidas pela movimentação da carga.

Face ao exposto é possível concluir que no início do carregamento a direção da tensão principal σ_1 é coincidente com o eixo do x . À medida que a carga se aproxima do elemento de solo em estudo, esta direção roda no sentido horário. No exato momento em que a carga se encontra sobre o elemento a direção da tensão principal máxima σ_1 é vertical, e aqui, as tensões tangenciais anulam-se. Quando a carga se afasta do elemento considerado, a direção da tensão principal máxima σ_1 roda no sentido anti-horário atingindo de novo a direção horizontal quando a carga está suficientemente afastada de modo a não se sentir o efeito da mesma. Em suma, pode-se concluir que a direção da tensão principal roda 180° desde o início até ao fim do movimento da carga.

A Figura 3.11 ilustra a comparação dos resultados obtidos com os presentes no artigo referido inicialmente.

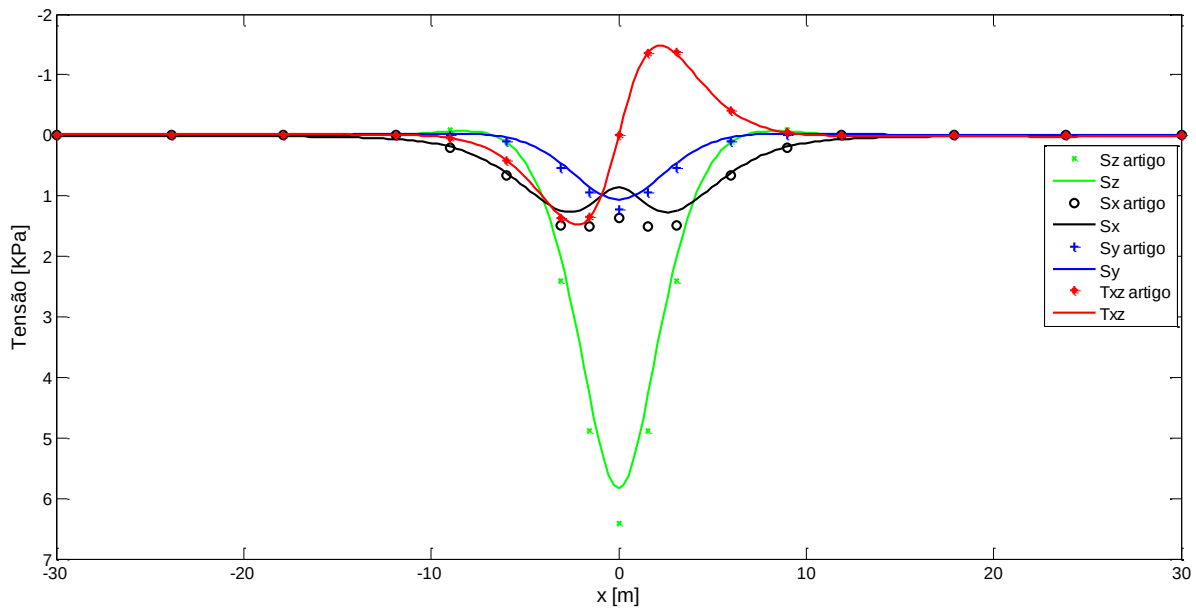


Figura 3.11 – Comparação dos resultados das tensões normais e tangenciais.

Como é possível observar, as semelhanças dos resultados avaliados por ambos os métodos são notórias. De facto há uma correspondência significativa entre os resultados, sobretudo na forma das curvas. As ligeiras diferenças obtidas na Figura 3.11 têm como principal justificação a interação entre a viga e o solo da fundação. De facto, no modelo desenvolvido pelos autores do artigo já referido, a superfície de contacto é uma superfície lisa, sendo assim nulas as tensões de corte nessa secção. Esta condição torna o modelo menos rígido do que o desenvolvido na modelação efetuada anteriormente. A assunção de condições de fronteira relaxadas leva a soluções mais flexíveis, sendo por isso justificada a diferença por defeito entre os resultados da bibliografia e os agora apresentados. A adoção de amortecimento, ainda que muito baixo, pode também ser uma justificação para as pequenas diferenças adotadas.

De modo a sintetizar a relação entre as tensões normais σ_x e σ_z e a tensão tangencial τ_{xz} , surge a Figura 3.12, onde se pode observar as várias combinações de tensões a que o elemento do solo é sujeito, ou seja, a curva mostra as sucessivas mudanças no estado de tensão com o movimento da carga.

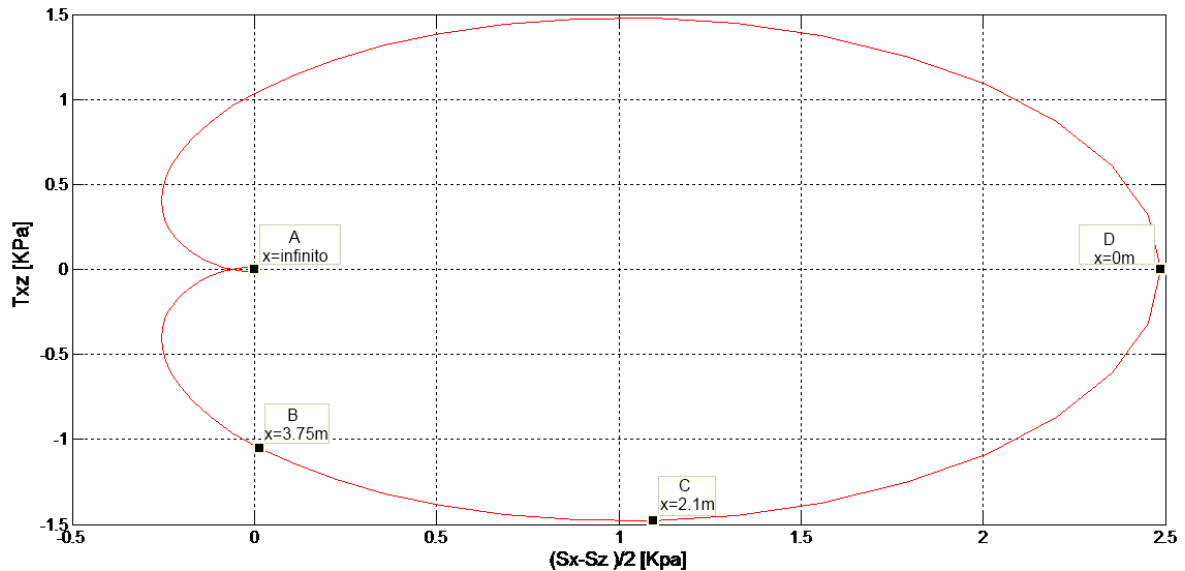


Figura 3.12 – Relação entre os incrementos da tensão de desvio e da tensão tangencial.

Como se pode observar, a curva representada tem o aspeto de uma maçã. O ponto A corresponde a considerar a aplicação da carga a uma distância suficientemente afastada ($x_v = \infty$) para não induzir qualquer alteração ao estado de tensão do elemento de solo em análise. Assim, as tensões de desvio são nulas. À medida que a carga se move em direção ao elemento, a tensão de corte aumenta rapidamente e torna-se dominante. O ponto B, correspondente a uma distância entre o ponto de aplicação da carga e o elemento de 3,75m ($x_v = 3,75\text{m}$), condiz à situação em que as tensões normais σ_x e σ_z se igualam, obtendo-se assim um estado de corte simples.

Mantendo a carga em movimento de aproximação ao elemento em análise, quer a tensão de corte quer a tensão de desvio aumentam continuamente, atingindo um máximo no ponto C, onde $x_v = 2,1\text{m}$. A partir desta distância a tensão tangencial começa a diminuir e a tensão de desvio continua a aumentar, tornando-se dominante. Quando a carga se encontra inscrita no plano que contém o ponto em análise, a tensão tangencial, como não poderia deixar de ser, anula-se. O ponto D traduz esse caso, encontrando-se o solo num estado de compressão triaxial. A partir deste ponto há uma inversão do descrito até aqui, pois a carga vai-se afastando continuamente do ponto em estudo.

Como se pode observar, o movimento de uma simples carga pontual provoca um complexo processo de alteração do estado de tensão num dado elemento do solo. É de notar que o elemento do solo se encontra sobre o plano de simetria, simplificando de forma significativa toda a interpretação efetuada.

De um modo geral, os objetivos finais, que passavam pela validação e estudo preliminar dos resultados dados pelo método de elementos finitos 2.5D, foram alcançados, dotando o autor de uma capacidade crítica superior para a análise a problemas de maior complexidade que se apresentarão no capítulo seguinte da presente dissertação.

4

ALTERAÇÕES NO ESTADO DE TENSÃO GEOMECÂNICO INDUZIDAS PELA AÇÃO DE TRÁFEGO FERROVIÁRIO

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O modelo numérico apresentado no capítulo anterior apresenta enormes potencialidades na análise das alterações ao estado de tensão geomecânico induzidas pelas ações verticais impostas pelo material circulante. Assim, está-se perante uma ferramenta adequada para uma correta interpretação teórica dos fenómenos associados quer à passagem de uma carga elementar, quer aos complexos fenómenos associados à circulação ferroviária, para as mais variadas combinações dos parâmetros que influenciam a forma e tipo das trajetórias de tensão. A possibilidade de avaliação dos referidos parâmetros, como por exemplo, a posição geométrica dos pontos do solo analisados e a velocidade de circulação do comboio, é extremamente útil para uma melhor perceção das alterações do estado de tensão.

De modo a dotar o trabalho a desenvolver de um maior realismo, aborda-se o caso de estudo do Campo experimental do Carregado, sendo adotadas as características geomecânicas e geométricas, embora não exatamente iguais, mas similares, eliminando complexidade dispensável ao cenário em estudo. Para um maior conhecimento do campo experimental referido, recomenda-se a leitura da referência bibliográfica Alves Costa (2011).

Como referido anteriormente, e com o objetivo de se tirar partido das imensas potencialidades do modelo numérico adotado, é apresentado ao longo do presente capítulo um extenso estudo incidente sobre as alterações ao estado de tensão, optando o autor por uma separação dos estudos conforme o mecanismo de excitação em análise (mecanismo quasi-estático ou mecanismo dinâmico). Na avaliação do mecanismo de excitação quasi-estático apresenta-se um estudo introdutório onde apenas se considera a aplicação de uma carga móvel, com o objetivo de ser mais perceptível a interpretação dos

resultados, antes de se entrar em análises mais complexas resultantes da simulação da passagem de comboios. Na análise ao mecanismo de excitação dinâmico procura avaliar-se o grau de influência deste comparativamente com o mecanismo de excitação quasi-estático, para diferentes pontos notáveis do maciço da fundação, considerando várias combinações de velocidades de circulação do comboio e frequências de oscilação da carga.

A realização de todos estes estudos paramétricos conduz ao objetivo central da presente dissertação: a análise às alterações do estado de tensão induzidas pelo tráfego ferroviário.

4.2. MODELAÇÃO NUMÉRICA E CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA

A secção transversal do sistema via-macijo é discretizada em elementos finitos, conforme as regras enunciadas no capítulo anterior respeitantes às dimensões da malha e dos elementos finitos, e pode ser observada na Figura 4.1. A camada envolvente do maciço da fundação representa as condições fronteira, modeladas recorrendo à metodologia dos PMLs, sendo conveniente referir que se devem considerar no mínimo seis camadas de elementos finitos para se obterem resultados satisfatórios. Como se pode observar nessa mesma figura, tira-se partido das condições de simetria do problema, obtendo-se uma assinalável redução do esforço computacional exigido.

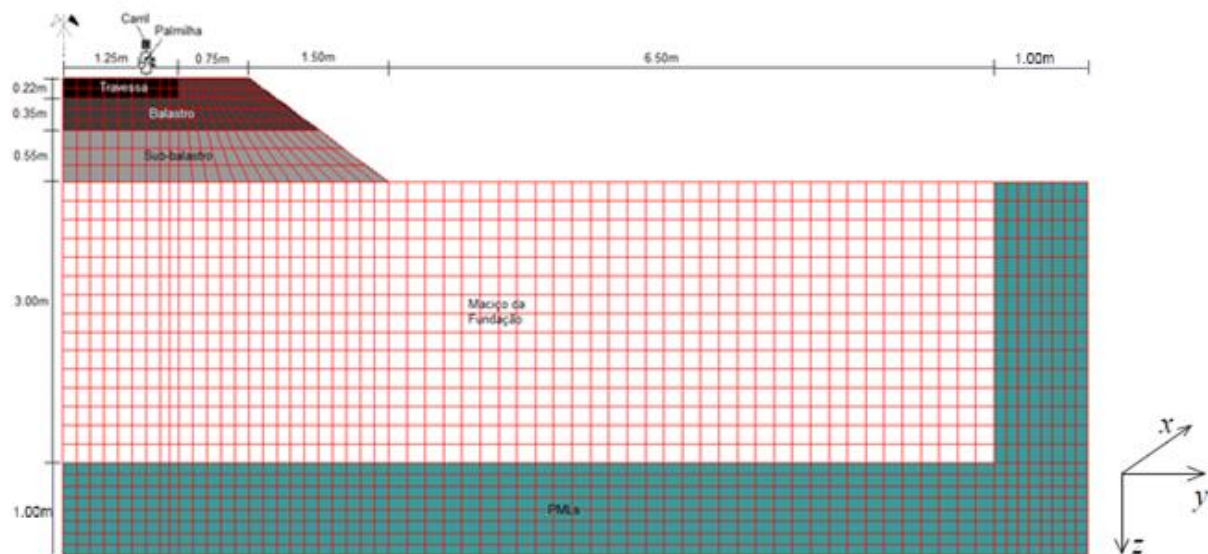


Figura 4.1 – Malha de elementos finitos 2.5D adotada ao estudo em causa.

Relativamente às propriedades constituintes das várias camadas e componentes do sistema via-macijo, estas são apresentadas no Quadro 4.1, referindo-se, uma vez mais, que tais propriedades estão de acordo com as apresentadas em Alves Costa (2011), relativamente ao Campo Experimental do Carregado.

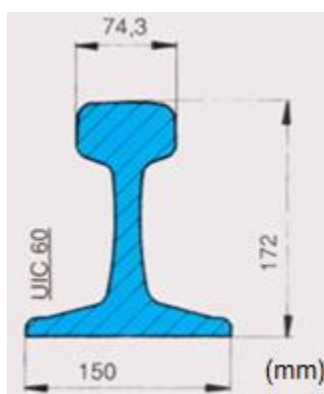
Quadro 4.1 – Propriedades dos vários elementos constituintes da linha férrea.

	Rigidez	Coefficiente de Poisson	Amortecimento	Massa
Carril	$EI_r=6.45 \text{ MPa}$	(-)	(-)	$m_r=64 \text{ kg/m}$
Palmilhas	$K_p=600 \text{ KN/mm}$	(-)	$C_p=22.5 \text{ KNs/mm}$	(-)
Travessas	$E=30000 \text{ MPa}$	$\nu=0,20$	$\xi=0,01$	$\rho=1833,3 \text{ kg/m}^3$ ($\rho=300 \text{ kg/un}$)
Balastro	$E=97 \text{ MPa}$	$\nu=0,12$	$\xi=0,061$	$\rho=1591 \text{ kg/m}^3$
Sub-balastro	$E=212 \text{ MPa}$	$\nu=0,30$	$\xi=0,054$	$\rho=1913 \text{ kg/m}^3$
Maciço de Fundação	$E=127,4 \text{ MPa}$	$\nu=0,49$	$\xi=0,03$	$\rho=1900 \text{ kg/m}^3$

Salienta-se ainda, que o carril modelado corresponde ao modelo UIC60 e as travessas utilizadas são construídas com betão pré-esforçado, em forma de monobloco (Figura 4.2).



a)



b)

Figura 4.2 – Elementos da superestrutura: a) Travessas tipo monobloco; b) Carril UIC60 (Adaptado de Ferroclubchile, 2012).

Para o maciço de fundação foi considerada uma velocidade de propagação de ondas S igual a 150 m/s (540 km/h), sendo plausível estes solos estarem sujeitos a velocidades de circulação muito próximas da velocidade crítica. Recorde-se que, em testes, o comboio de levitação magnética japonês atingiu velocidades na ordem dos 582 km/h, superando assim, o anterior record de velocidade detido pelo TGV na linha Paris-Estrasburgo de 574.5 km/h.

4.3. DEFINIÇÃO DO DIAGRAMA P-Q

Por uma questão de simplicidade na representação das trajetórias de tensão adotar-se-á uma representação num *diagrama p-q*, em que *p* corresponde ao valor da tensão média e *q* ao valor da tensão de desvio, sendo definidos pelas seguintes equações:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (4.1)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2} * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4.2)$$

onde as variáveis σ_1 , σ_2 e σ_3 representam as tensões principais.

A determinação destas tensões apresenta uma vasta formulação matemática, pelo que, de modo a não sobrecarregar em demasia o leitor, apenas se expõe a formulação estritamente necessária utilizada no seu cálculo, remetendo-se para Dias da Silva (1995) esclarecimentos adicionais.

De modo a esclarecer a notação utilizada para as tensões normais e tangenciais presentes num qualquer elemento do solo, observe-se a Figura 4.3 que representa as convenções utilizadas na presente dissertação. Chama-se a atenção que se consideram as compressões como positivas, conforme é habitual em geotecnia.

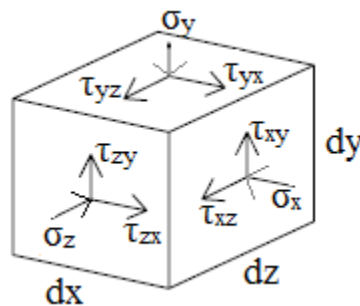


Figura 4.3 – Representação das tensões normais e tangenciais.

As tensões atuantes num dado elemento infinitesimal podem ser agrupadas num tensor de tensões, $[\sigma]$, sendo possível encará-lo como uma operador linear simétrico, denominações pertencentes ao domínio da Álgebra Linear. Desta área do conhecimento sabe-se que o mesmo é sempre diagonalizável e, verificando-se a existência de raízes distintas na resolução da sua equação característica, os valores

próprios da matriz do tensor das tensões são ortogonais entre si. Ora, este facto num contexto de estados de tensão, significa que num elemento do solo existem três facetas perpendiculares e o vetor da tensão tem uma direção normal a cada uma dessas facetas e, por consequente, a tensão tangencial é nula. Está-se portanto na presença das denominadas tensões principais.

A formulação matemática que se segue, pretende deduzir as expressões usadas na determinação das grandezas referidas anteriormente, a partir do tensor de tensões definido num referencial cartesiano, tal como indicado na Figura 4.3.

O tensor de tensões já referido, é dado na Equação (4.3):

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Este tensor é simétrico, pois as componentes das tensões tangenciais concorrentes numa dada aresta têm de ser iguais, para se verificar o equilíbrio estático dum qualquer elemento. Continuando a exposição para a determinação das tensões principais, é necessário determinar os valores próprios da matriz anterior. Assim, vem a Equação (4.4):

$$\det \left(\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sigma & 0 & 0 \\ 0 & \sigma & 0 \\ 0 & 0 & \sigma \end{bmatrix} \right) = 0 \quad (4.4)$$

$$\Leftrightarrow$$

$$-\sigma^3 + I_1\sigma^2 - I_2\sigma + I_3 = 0$$

onde I_1 , I_2 e I_3 representam os invariantes do estado de tensão e são dados por:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (4.5)$$

$$I_2 = \sigma_x\sigma_y + \sigma_x\sigma_z + \sigma_y\sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{yz}^2 \quad (4.6)$$

$$I_3 = \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{xz}\tau_{yz} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2 \quad (4.7)$$

As raízes da Equação (4.4) são as tensões principais, o motivo desta exposição. Estas grandezas irão ser extremamente úteis na representação das trajetórias de tensão induzidas pelo movimento de cargas, que se apresentarão posteriormente.

4.4. ESTUDO DAS ALTERAÇÕES NO ESTADO DE TENSÃO INDUZIDAS PELA PASSAGEM DE UMA CARGA ELEMENTAR (MECANISMO QUASI-ESTÁTICO)

4.4.1. EVOLUÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE TENSÃO EM PROFUNDIDADE

É certo que o estado de tensão do solo sofre importantes modificações em virtude da profundidade em que se procede à sua análise. Assim, neste ponto da presente dissertação pretende-se avaliar essas mesmas alterações e sistematizá-las de uma forma coerente e de fácil interpretação.

De modo a facilitar a perceção dos valores obtidos, considere-se a aplicação de uma carga elementar de valor igual a 130 kN, correspondente, grosso modo, à carga transmitida por um eixo de um comboio Alfa-Pendular, e a movimentar-se a uma velocidade constante e igual a 30 m/s (108 km/h). Sem embargo do cenário admitido, pode adiantar-se desde já que, de uma forma qualitativa, se verifica uma grande semelhança de comportamento para velocidades de circulação inferiores à velocidade crítica.

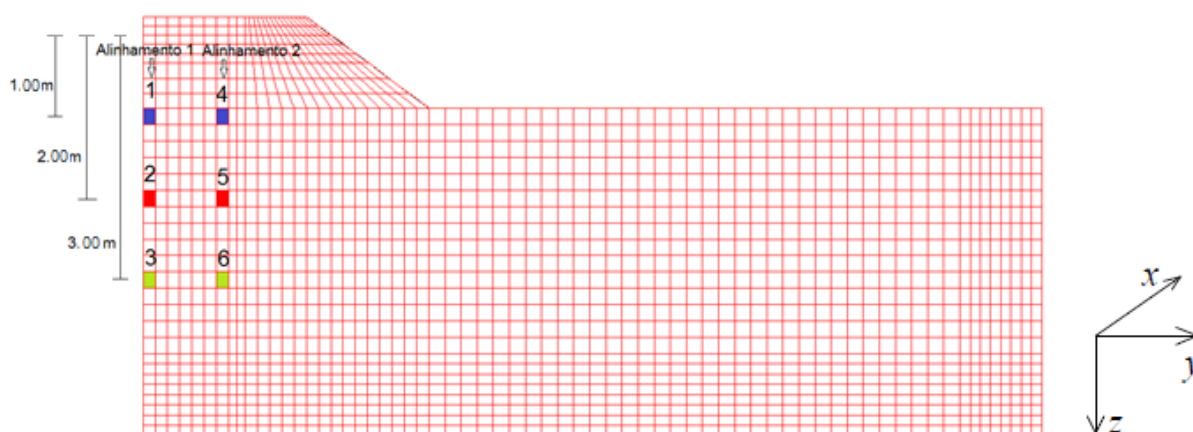


Figura 4.4 – Representação geométrica dos elementos em análise.

Para começar, observe-se a Figura 4.5 onde consta a evolução das tensões normais e tangencial em função da distância da carga à secção em estudo, referentes ao Elemento 1 (um metro de profundidade média) representado na Figura 4.4. Estando este elemento sob o plano de simetria, as tensões tangenciais nos *planos* xy e yz são nulas, ou seja, o elemento não sofre distorções nestes planos, e como tal não são representadas na figura.

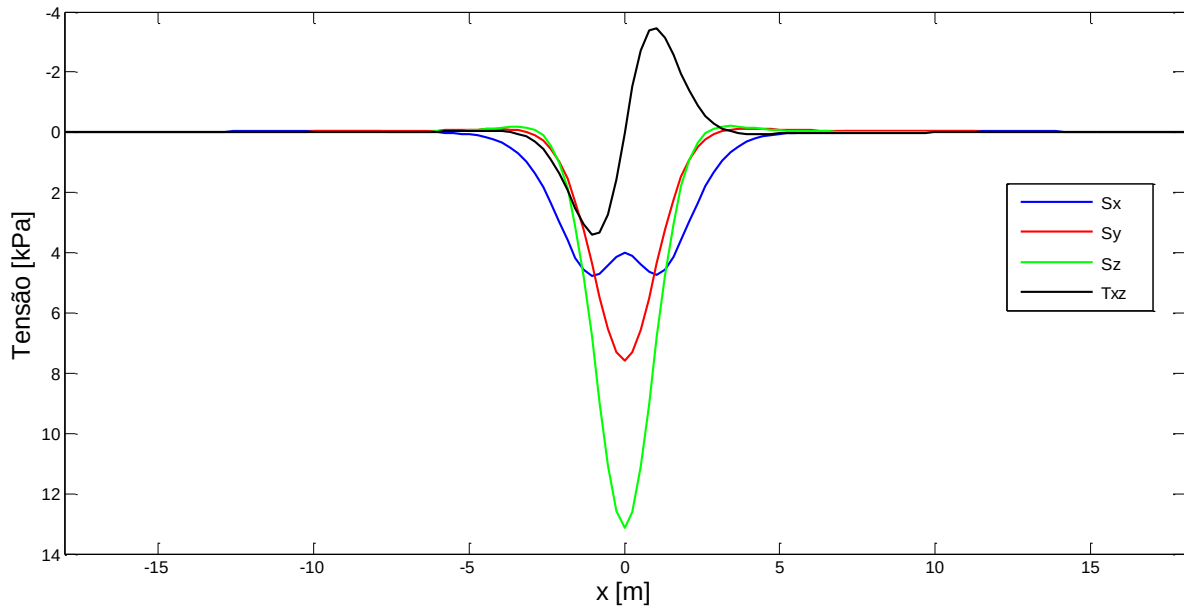


Figura 4.5 – Evolução das tensões normais e tangenciais em função da distância da carga móvel (Elemento 1; $V=30\text{m/s}$).

Analisando ainda a mesma figura, é possível notar que só se começam a sentir as alterações ao estado de tensão do elemento quando a carga se encontra relativamente próxima, isto é, aproximadamente numa faixa de cinco metros para cada lado da secção. Comparando esta mesma figura com a Figura 4.6, onde se avalia a alteração no estado de tensão para o Elemento 3 (três metros de profundidade média), representado na Figura 4.4, é claramente notória a atenuação dos acréscimos de tensão com o aumento da profundidade do ponto em análise.

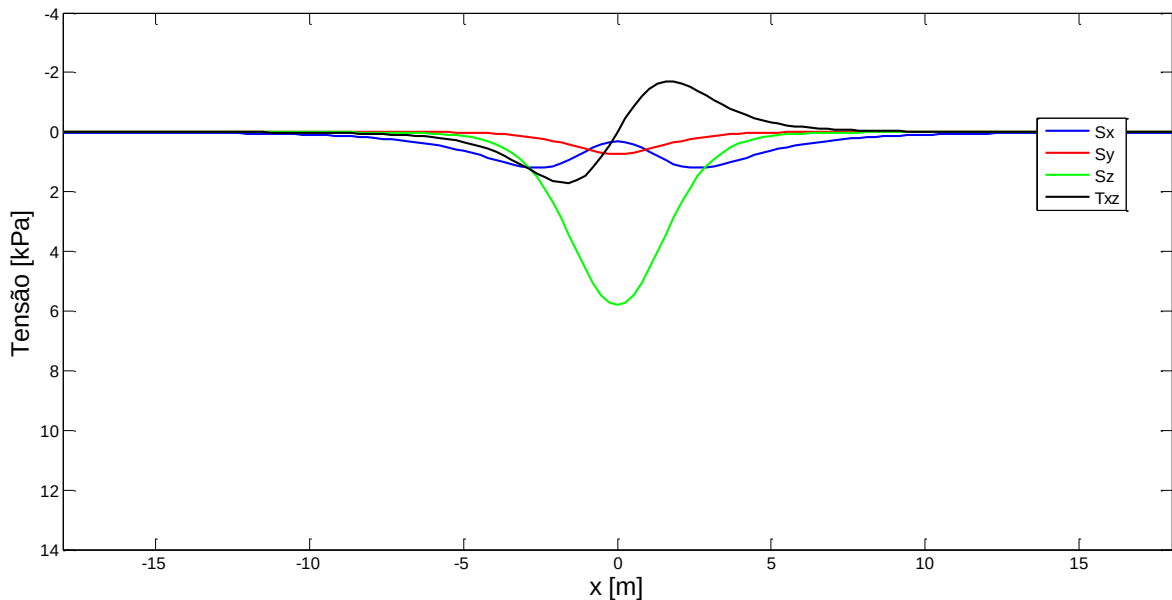


Figura 4.6 – Evolução das tensões normais e tangenciais em função da distância da carga móvel (Elemento 3; $V=30\text{m/s}$).

Há ainda a evidenciar o facto de as alterações ao estado de tensão, em função da distância da carga, se começarem a sentir primeiramente nos pontos a maior profundidade. Esta constatação pode ser

extrapolada e interpretada com base numa analogia com os incrementos de tensão originados pelo carregamento de uma dada área, representados através dos chamados *bolbos de tensão*. A Figura 4.7 a) representa o bolbo das tensões verticais incrementais para o caso de uma área quadrada carregada uniformemente. Na mesma figura, cada curva exibida representa o lugar geométrico dos pontos com igual tensão incremental, fração da pressão aplicada à superfície. (Matos Fernandes, 2006).

As curvas em forma de bolbo referidas, apresentam uma área de influência superior a maiores profundidades, embora o seu valor absoluto seja significativamente inferior, ideia também corroborada pela análise à Figura 4.7 b). É precisamente este aspeto evidenciado anteriormente para os elementos a diferentes profundidades, constatando-se a pertinência desta análise.

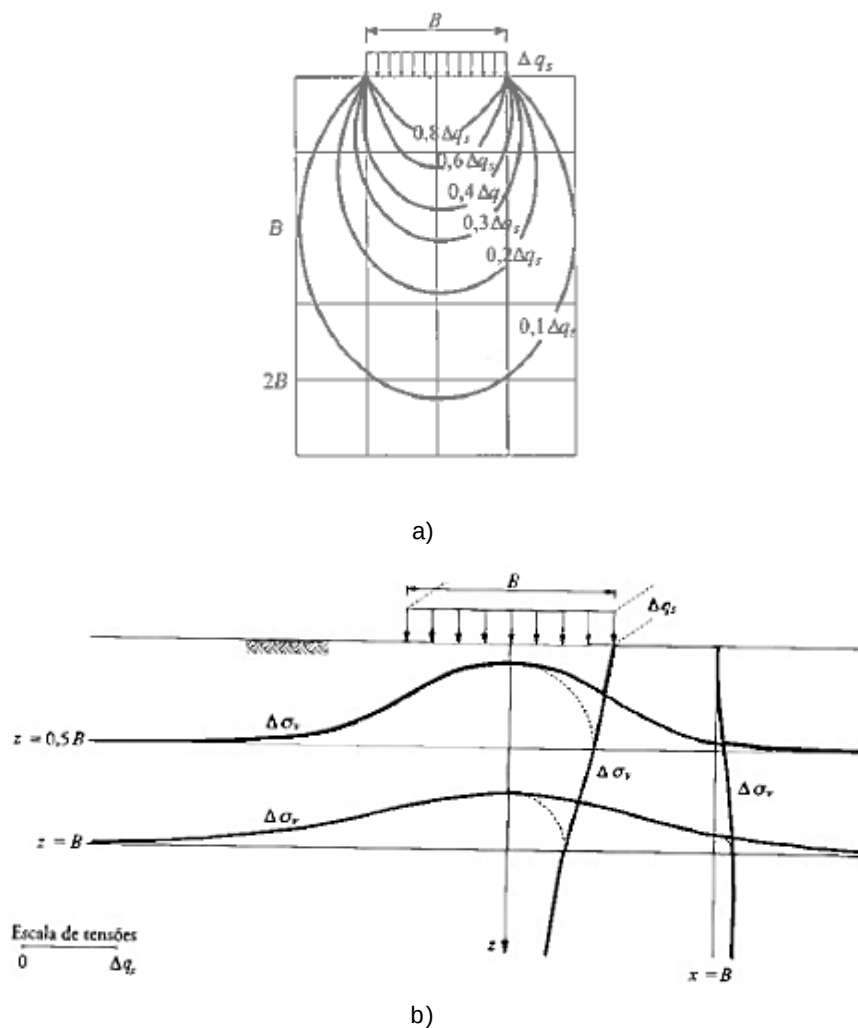


Figura 4.7 – Degradação de tensões verticais em profundidade: a) *Bolbos de tensões* – área quadrada carregada uniformemente; b) Degradação das tensões em profundidade – faixa de desenvolvimento infinito carregada uniformemente (Matos Fernandes, 2006).

Ainda com o intuito de avaliar a evolução em profundidade dos incrementos de tensões normais, considere-se as Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, nas quais é representada tal evolução ao longo do eixo de simetria e para as distâncias de carregamento de $x=0,0$ m, $x=1,6$ m e $x=5,0$ m, respetivamente, para uma velocidade de 30 m/s.

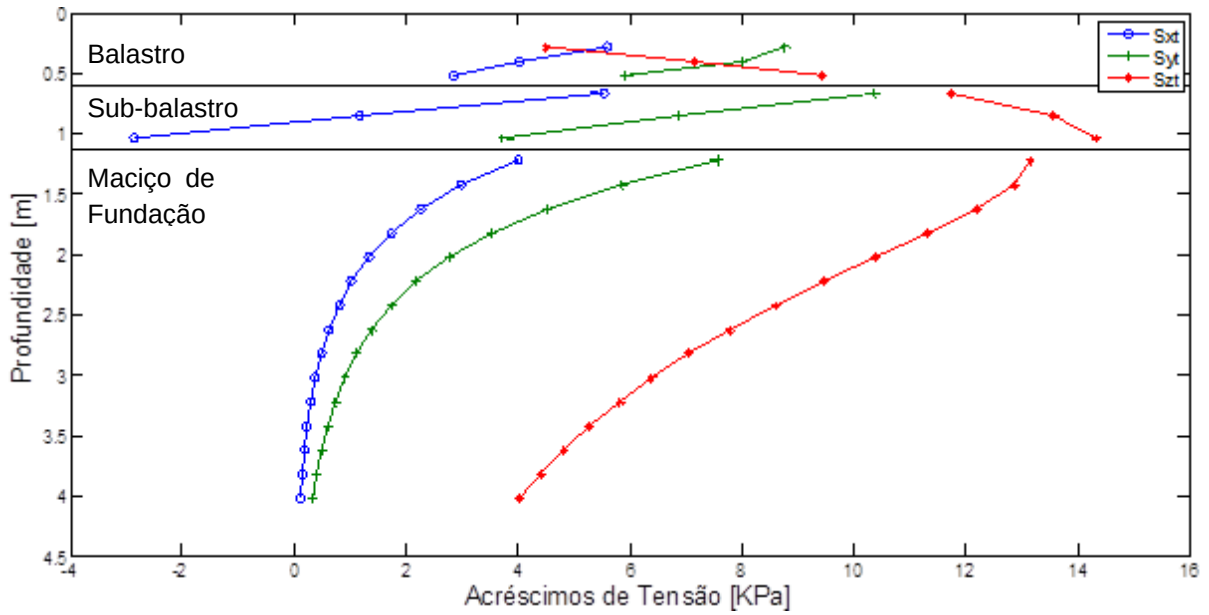


Figura 4.8 – Evolução das tensões normais em profundidade com a carga sobre secção de referência (x=0.0 m).

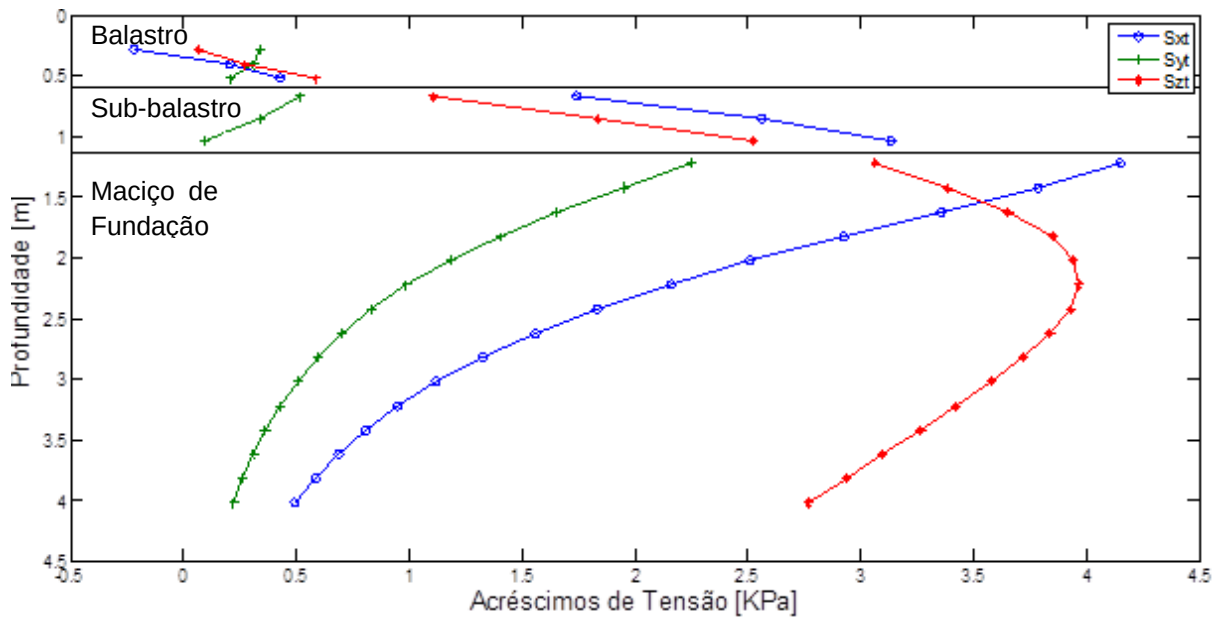


Figura 4.9 – Evolução das tensões normais em profundidade com a carga a uma distância de x=1.6 m da secção de referência.

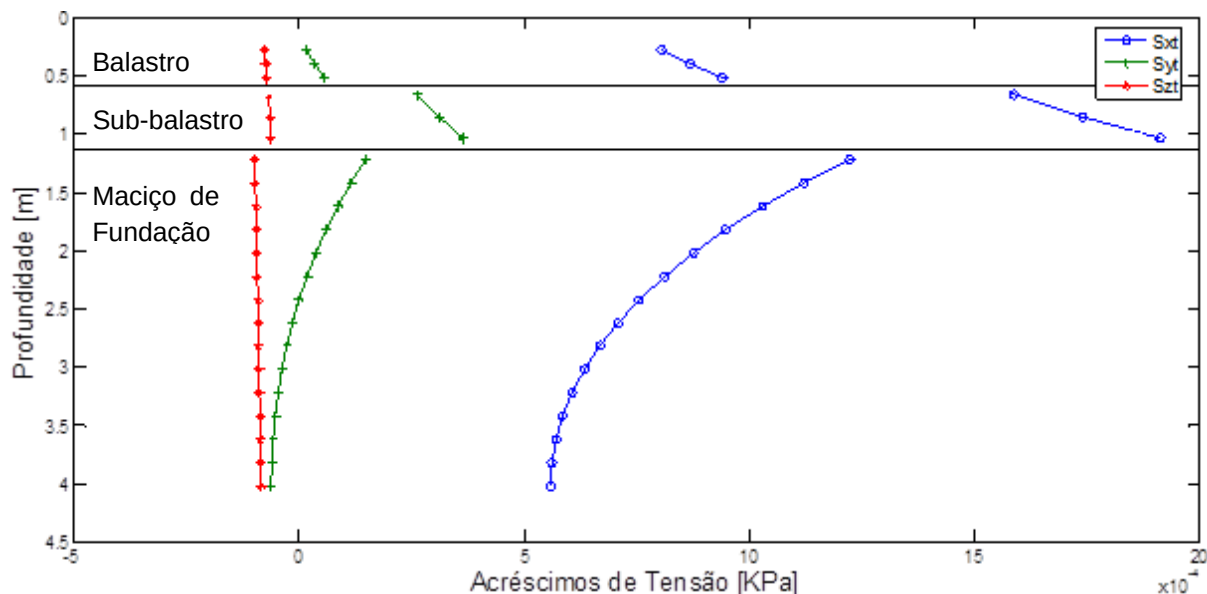


Figura 4.10 – Evolução das tensões normais em profundidade com a carga a uma distância de $x=5.0$ m da secção de referência.

Nas três figuras referidas, o primeiro ponto a ser representado é o correspondente ao elemento que se encontra imediatamente abaixo da travessa e o último corresponde ao elemento em que o seu ponto médio se encontra a uma profundidade de quatro metros. É ainda conveniente referir que os três primeiros pontos de cada linha da evolução da respetiva tensão normal correspondem aos elementos representativos do balastro, os três seguintes do sub-balastro e os restantes representam o maciço da fundação.

Como se pode observar as três camadas referidas apresentam comportamentos distintos, devido sobretudo às suas propriedades geomecânicas serem muito diferentes, diferindo também o seu padrão de comportamento em função do ponto de aplicação da carga, como seria expectável. O nível de tensão verificado num qualquer corpo material está dependente do modelo constituinte adotado, o que leva a concluir que as diferenças da evolução de uma qualquer tensão em profundidade são decorrentes da diferente rigidez que cada qual apresenta.

Chama-se ainda a atenção para o facto de se estar perante uma análise 2.5D, o que induz, principalmente na camada de balastro, uma disposição de tensões diferente da que se verifica na realidade. Esta condição ocorre uma vez que se está a considerar as travessas como apoios contínuos, sendo estes na realidade discretos, ou seja, na realidade as tensões a pequenas profundidades são muito concentradas, efeito este que tende a dissipar-se com o aumento da profundidade.

Outro aspeto a ser referido diz respeito à geração de incrementos de tensão negativos, ou seja, há uma alteração do estado de tensão com redução das tensões originadas pela ação do peso próprio, para determinados posicionamentos da carga no momento da análise, embora com valores absolutos reduzidos, conforme se pode observar na Figura 4.10 para as tensões σ_z e σ_y .

No seguimento do estudo das alterações ao estado de tensão que se verificam com a passagem de uma carga elementar e para uma perceção geral do problema no domínio do tempo, apresenta-se a Figura 4.11 onde se pode observar a totalidade das tensões normais e tangenciais para uma velocidade de 30 m/s, correspondentes aos Elementos 1 e 4 indicados na Figura 4.4. Chama-se a atenção para o facto de

não serem representadas as curvas de tensões tangenciais τ_{xy} e τ_{yz} , relativas ao Elemento 1, por este se encontrar sob o plano de simetria e como tal, as mesmas serem nulas.

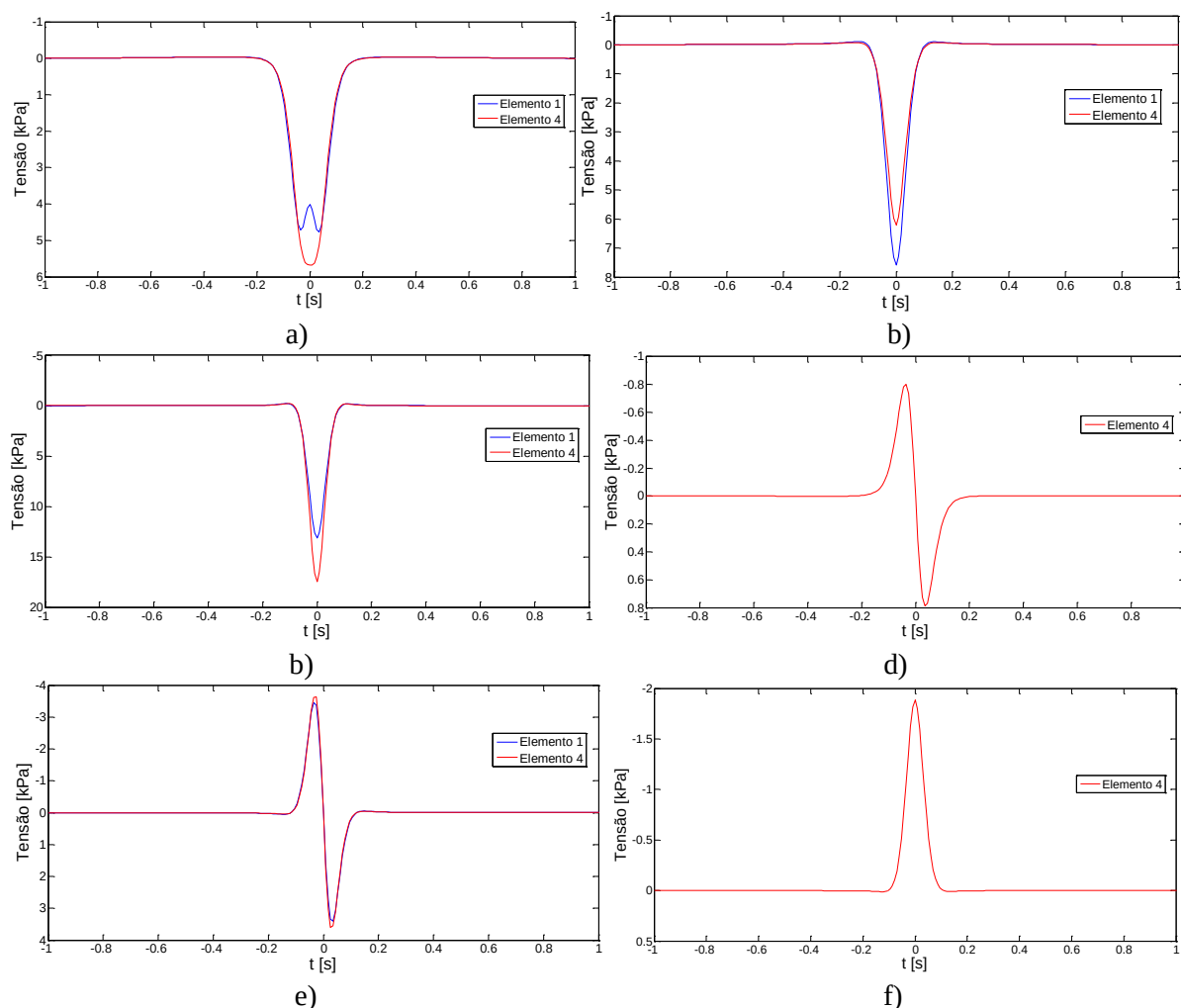


Figura 4.11 – Representação, em função do tempo, das alterações do estado de tensão preconizadas pela passagem de uma carga elemental à velocidade de 30m/s: a) Tensão normal σ_x ; b) Tensão normal σ_y ; c) Tensão normal σ_z ; d) Tensão tangencial τ_{xy} ; e) Tensão tangencial τ_{xz} ; f) Tensão tangencial τ_{yz} .

Visualizadas as mudanças no estado de tensão no domínio do tempo de alguns elementos constituintes do maciço que suporta a via-férrea, pode-se partir para uma sistematização das trajetórias de tensão preconizadas por tais mudanças. As Figuras 4.12 e 4.13 correspondem à avaliação das trajetórias de tensão num *gráfico p-q*, conforme definido anteriormente, em profundidade. As mesmas figuras reportam também as mudanças sofridas pelas trajetórias de tensão em elementos junto ao eixo de simetria (alinhamento 1) e ao alinhamento do carril (alinhamento 2), conforme representado na Figura 4.4, para uma velocidade de 30 m/s. Sublinha-se que apesar de só serem apresentados os estudos correspondentes a uma velocidade de 30 m/s, o comportamento observado é similar para valores de velocidades mais elevadas.

Da análise às referidas figuras poder-se-á observar a evolução quer dos incrementos de tensão média (dp), quer dos incrementos de tensão de corte (dq) e com base nestas medidas é possível avaliar a razão de tensões (dq/dp) e retirar as devidas ilações.

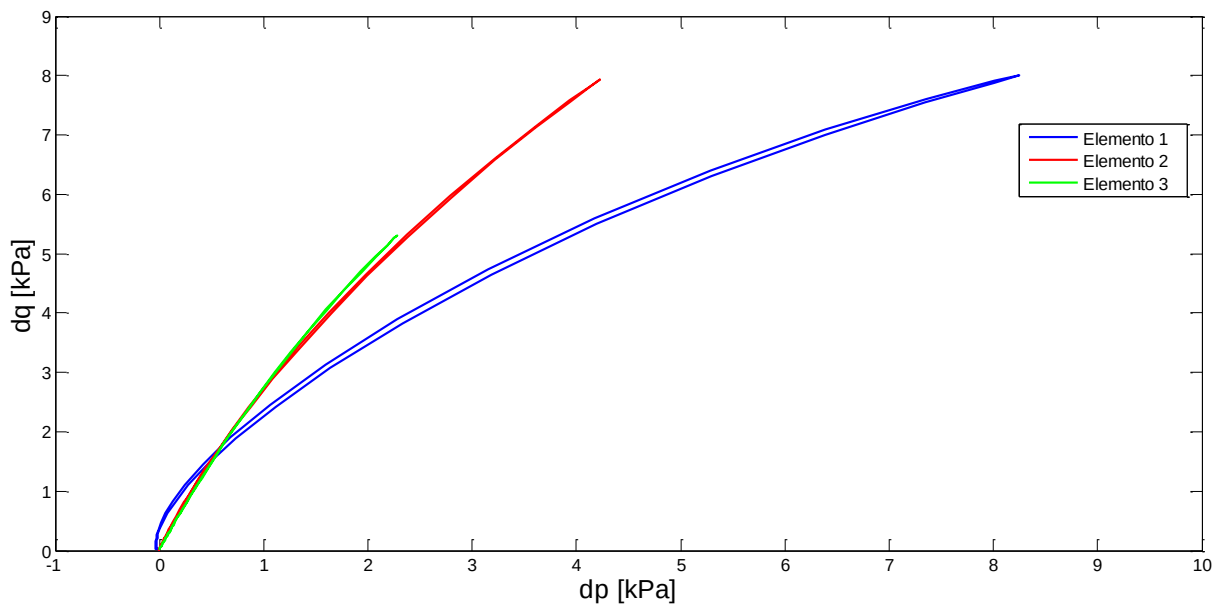


Figura 4.12 – Evolução das trajetórias de tensão nos pontos pertencentes ao alinhamento 1 ($V=30$ m/s).

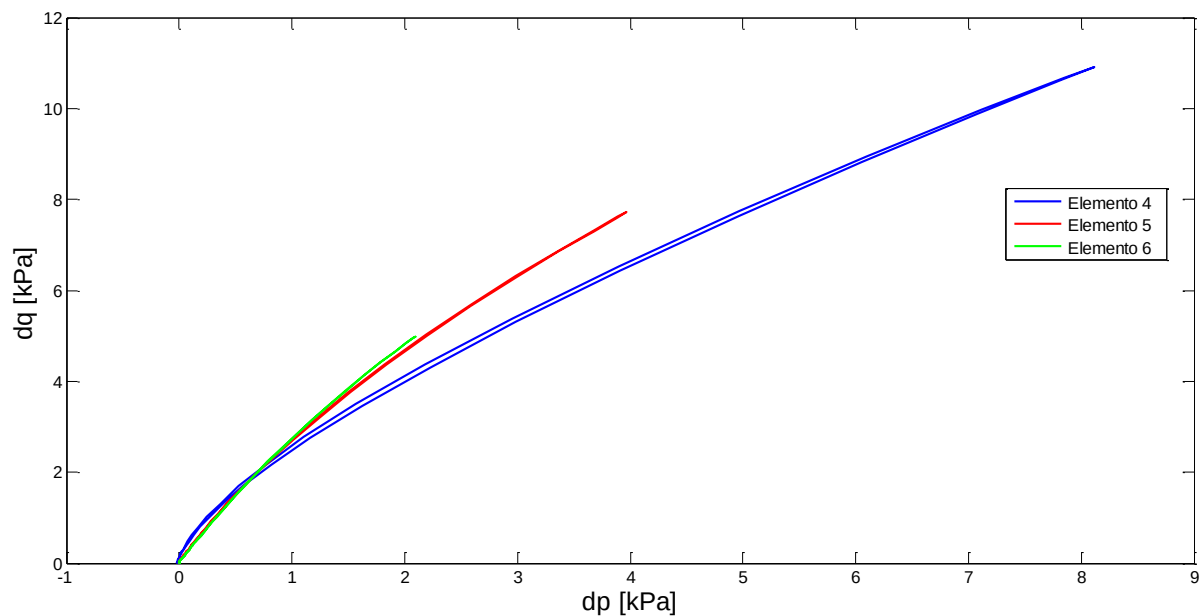


Figura 4.13 – Evolução das trajetórias de tensão nos pontos pertencentes ao alinhamento 2 ($V=30$ m/s).

De uma forma meramente qualitativa os dois gráficos apresentados são semelhantes. Para uma avaliação quantitativa dos resultados, apresenta-se o Quadro 4.2, que ilustra a anteriormente referida razão de tensões.

Quadro 4.2 – Razão de tensão $q_{m\acute{a}x}/p_{m\acute{a}x}$ para os diversos pontos pertencentes aos alinhamentos 1 e 2.

Alinhamento 1	Elementos	1	2	3
	$q_{m\acute{a}x}$ [KPa]	8,00	7,93	5,31
	$p_{m\acute{a}x}$ [KPa]	8,25	4,23	2,28
	Razão de Tensão	0,97	1,87	2,33
Alinhamento 2	Elementos	4	5	6
	$q_{m\acute{a}x}$ [KPa]	10,91	7,71	4,99
	$p_{m\acute{a}x}$ [KPa]	8,11	3,97	2,10
	Razão de Tensão	1,35	1,94	2,38

Os valores indicados no Quadro 4.2 permitem constatar que à medida que se caminha em profundidade os decréscimos nos incrementos de tensão média são muito mais significativos que os da tensão de corte, o que revela que o solo ainda apresenta um grau de distorção considerável.

Comparando os valores para os dois casos analisados, verifica-se que seguem a mesma tendência de aumento da razão de tensão, sendo a maior diferença, como não poderia deixar de ser, verificada nos elementos situados mais próximo da superfície, onde o acréscimo das tensões de corte é mais pronunciado para o caso dos elementos no alinhamento do carril em virtude de estes não se encontrarem sob o plano de simetria, implicando a existência de tensões tangenciais nos três planos normais e, por consequente, um maior grau de distorção.

4.4.2. EVOLUÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE TENSÃO COM A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

A velocidade de circulação de um comboio é um fator fulcral na avaliação das vibrações produzidas e, por consequente, na alteração do estado de tensão do maciço. Assim, é expectável uma pronunciada influência deste fator na evolução das trajetórias de tensão. Para avaliar esse efeito consideram-se os Elementos 1 e 2 indicados na Figura 4.14.

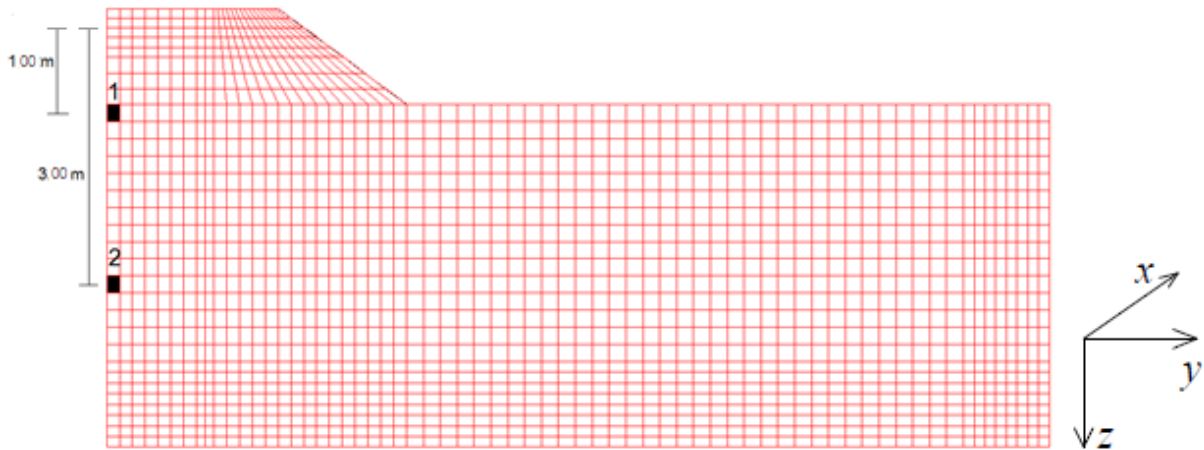


Figura 4.14 – Representação esquemática dos elementos em análise.

A Figura 4.15 realça a evolução da tensão normal σ_z no Elemento 1 com o aumento da velocidade. As velocidades testadas correspondem a uma velocidade relativamente baixa (30 m/s), uma velocidade intermédia (100 m/s) e uma velocidade muito alta (150 m/s) igual à velocidade de propagação das ondas S. É para velocidades próximas a esta que o solo sofre grandes alterações no seu estado de tensão e, por consequente, problemas graves podem ser imputados ao funcionamento da via-férrea, conforme alguns casos reportados em diversa bibliografia (Alves Costa, 2011; Yang *et al*, 2009; Hall, 2000).

Nessa mesma figura pode-se comprovar o aumento dos incrementos de tensão normal σ_z com o aumento da velocidade de circulação da carga, chamando-se especial atenção ao leitor para as ocorrências verificadas aquando da circulação a uma velocidade de 150 m/s. Apesar desta velocidade apenas ser atingida em testes, espera-se que no futuro a generalidade das linhas de alta velocidade possam atingir estas velocidades e, como tal, a simulação do comportamento do maciço e da estrutura férrea para velocidades desta ordem de grandeza é pertinente. Como se pode observar à medida que a velocidade aumenta deixa de se verificar uma simetria entre a aproximação da carga à secção de referência e sequente afastamento. Além disto, surge ainda uma espécie de “cauda”, à medida que esta se desloca, devido aos fenómenos de ressonância que surgem, observando-se a vibração livre após a passagem da carga pela secção de referência.

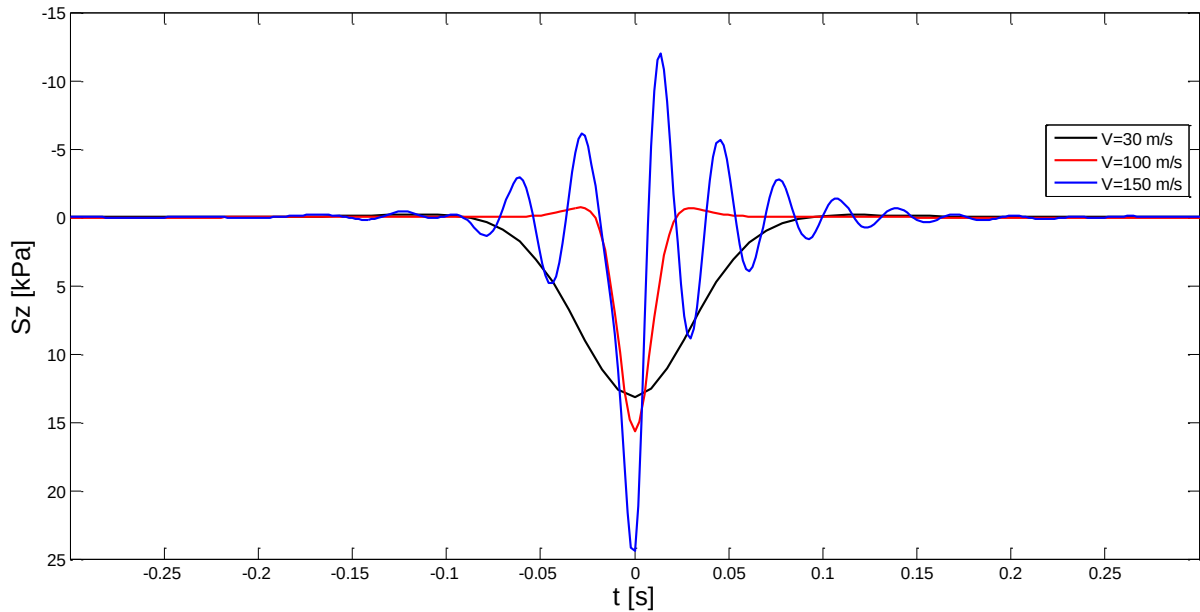


Figura 4.15 – Registro temporal do incremento de tensão normal σ_z no Elemento 1 para diferentes velocidades de circulação.

Os incrementos de tensão originados pelo carregamento em estudo podem ser expressos através das trajetórias de tensão, num gráfico p - q , levando em consideração o estado de tensão inicial. Para a geração deste estado considerou-se a atuação do peso próprio e um coeficiente de impulso em repouso K_0 igual a 1.0, ou seja, está-se na presença de um estado de tensão inicial isotrópico. Esta simplificação permite uma maior facilidade na leitura dos resultados. Nas mesmas representações gráficas são apresentadas duas linhas de rotura indicativas, correspondentes a trajetórias de extensão e de compressão. Realça-se que os critérios de cedência que se apresentam são meramente indicativos, pois a análise é efetuada no domínio da elasticidade.

As linhas de rotura referidas são obtidas pela seguinte expressão:

$$q = M * p \quad (4.8)$$

em que M representa o declive da linha dos estados críticos no referencial p - q já definido anteriormente e assume o valor dado pela seguinte expressão:

$$M = \frac{3\text{sen}(\phi')}{\sqrt{3}\cos(\theta) - \text{sen}(\theta)\text{sen}(\phi')} \quad (4.9)$$

O parâmetro M , como se pode observar, depende do invariante das tensões θ , representado na Equação (4.10). Este modelo, conforme referido em Alves Costa (2005), adota a superfície de rotura (superfície de estados críticos) de Mohr-Coulomb, em detrimento da superfície de Druker-Prager adotada em outros modelos. No entanto, no contexto em análise, esta questão perde importância pois a superfície de rotura adotada é meramente indicativa, sendo adotado um valor do ângulo θ , dado pela Expressão (4.10), igual a -30° ou 30° , conforme se trate de uma trajetória de compressão ou de extensão, respetivamente, valores para os quais as duas superfícies de cedência, de Mohr-Coulomb e Druker-Prager, são coincidentes. O ângulo ϕ corresponde ao valor do ângulo de resistência ao corte do solo, normalmente conhecido por ângulo de atrito interno, e foi assumido igual a 31° .

$$\theta = \frac{1}{3} \sin^{-1} \left[-\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{(J_2)^{3/2}} \right] \quad \text{com } -\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{6} \quad (4.10)$$

sendo J_2 e J_3 os invariantes do estado de tensão, calculados a partir das Expressões (4.11) e (4.12).

$$J_2 = \frac{1}{2} I_1^2 - I_2 \quad (4.11)$$

$$J_3 = \frac{1}{3} I_1^3 - I_1 I_2 + I_3 \quad (4.12)$$

tendo I_1 , I_2 e I_3 o mesmo significado apresentado anteriormente.

As Figuras 4.16 e 4.17 representam as trajetórias de tensão, mediante a velocidade de circulação, em correspondência com os Elementos 1 e 2 indicados na Figura 4.14. Desde já se adianta que o estado de tensão inicial, ou seja, a profundidade de um dado elemento é um fator de elevada importância para o alcance da superfície de cedência.

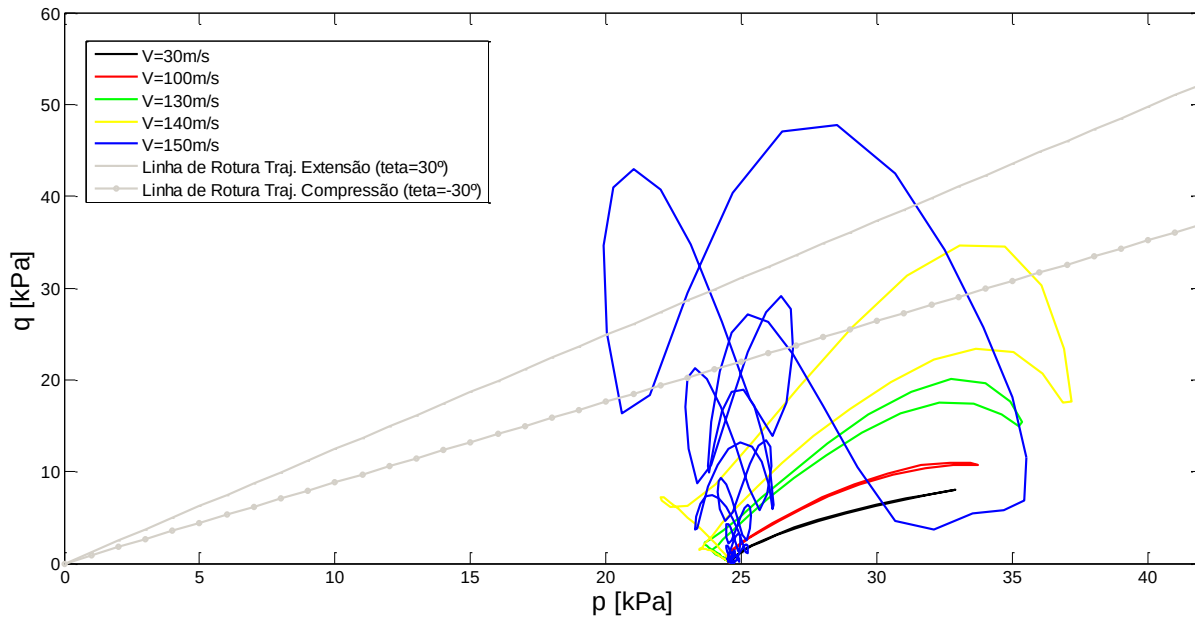


Figura 4.16 – Evolução das trajetórias de tensão em função da velocidade de circulação (Elemento 1).

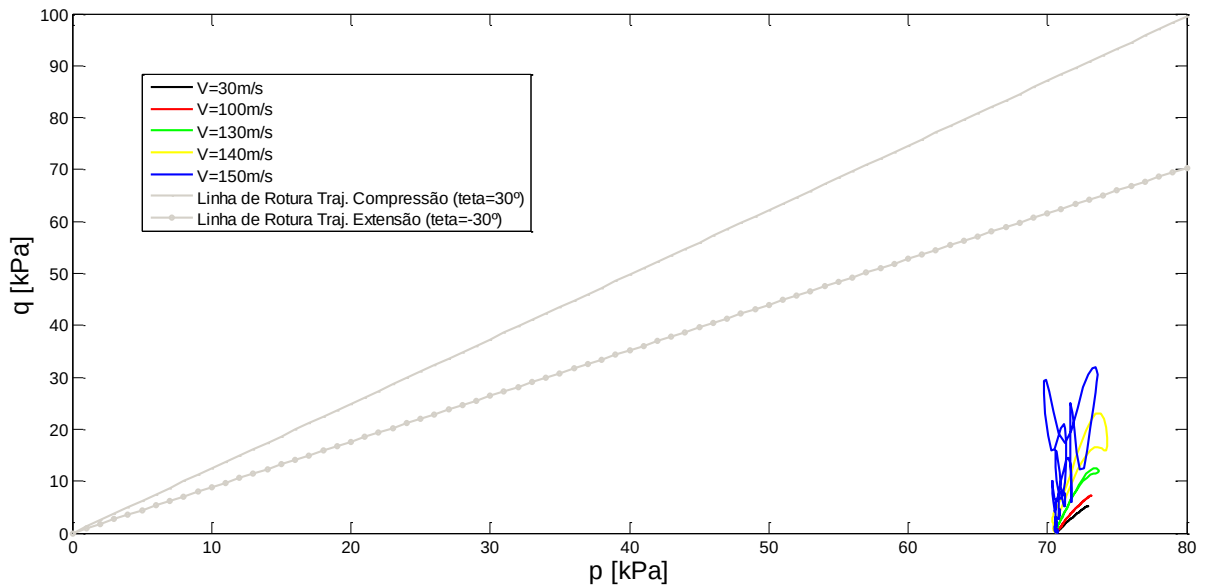


Figura 4.17 – Evolução das trajetórias de tensão em função da velocidade de circulação (Elemento 2).

Nas figuras anteriores estão representadas as trajetórias de tensão para cinco velocidades diferentes. Para além das velocidades anteriormente apresentadas na Figura 4.15, juntam-se as velocidades de 130 m/s e 140 m/s, que fornecem uma importante ajuda na análise às alterações verificadas. Assim, com este conjunto de velocidades poder-se-á dispor de um leque alargado de trajetórias de tensão que vão desde velocidades baixas (30 m/s) a velocidades muitíssimo elevadas (150 m/s).

De uma forma meramente qualitativa, a forma das trajetórias de tensão nos dois elementos em estudo para as várias velocidades são semelhantes, o que demonstra uma certa uniformidade no tipo de trajetórias seguidas. Esta constatação não entra em conta com o estado de tensão inicial, que por uma questão de escala torna as figuras bastantes díspares. Por outro lado, a conjugação da redução dos incrementos da tensão média e da tensão de corte com a profundidade e o aumento dos valores da tensão inicial provoca um afastamento das trajetórias de tensão da superfície de rotura, como aliás seria expectável.

Os ciclos carga-descarga são identificados de uma forma clara na análise das Figuras 4.16 e 4.17. O ramo correspondente ao ciclo de carga do elemento do solo em estudo, originado pela aproximação da carga elementar, é o ramo superior do ciclo e a linha de rotura indicativa corresponde à trajetória de compressão indicada. Com o afastamento da carga da secção em estudo, o elemento sofre uma trajetória de extensão que tem por correspondência o ramo inferior do ciclo, ou seja, está-se perante o ciclo de descarga.

À medida que se aumenta a velocidade, os incrementos na tensão de corte são muito superiores aos que se verificam ao nível da tensão média, o que aproxima as trajetórias de tensão da superfície de rotura. Relativamente à Figura 4.17 verifica-se, para qualquer velocidade considerada, um afastamento considerável da superfície de rotura em virtude da elevada tensão inicial existente. No entanto, a Figura 4.16 já apresenta uma grande particularidade, materializada na superação da superfície de cedência indicativa, quando se atingem velocidades muito elevadas. No entanto, o leitor deve ter presente que estas linhas de rotura são meramente indicativas, pois está-se perante um cálculo elástico,

como já referido anteriormente, e portanto, o resultado referido não tem correspondência direta com o conceito de rotura, no verdadeiro sentido do termo, sendo o resultado alcançado impossível.

Outro aspeto a realçar é a grande complexidade no formato das trajetórias de tensão para velocidades muito elevadas. A Figura 4.15, onde se representa a tensão normal σ_z em função do tempo, fornece as pistas necessárias para a sua interpretação. Os fenómenos de amplificação dinâmica, em virtude da elevada velocidade simulada, originam complexas alterações ao estado de tensão como as demonstradas e esse comportamento refletem-se, como não poderia deixar de ser, nas trajetórias de tensão, num *diagrama p-q*.

Uma grandeza indicativa que pode dar ideia da acerca dos aumentos das tensões com o incremento da velocidade, designada por fator de amplificação dinâmica, é a razão entre a máxima tensão verificada para a máxima velocidade considerada, neste caso 150 m/s, e a menor, 10 m/s. A consideração desta velocidade adicional muito reduzida, permite constatar que foram atingidos os valores mínimos, com tendência assintótica, de tensão de corte e tensão média provocados pela passagem de uma carga elementar de 130 kN.

O Quadro 4.3, que se apresenta de seguida, traduz exatamente os valores das grandezas referidas.

Quadro 4.3 – Determinação do fator de amplificação dinâmica para a velocidade de 150m/s.

		Velocidade [m/s]						Fator de amplificação dinâmica para V=150 m/s
		10	30	100	130	140	150	
$q_{\text{máx}}$ [kPa]	Elemento 1	7,83	8,00	10,99	20,09	34,66	47,71	6,09
	Elemento 2	5,20	5,31	7,34	12,51	23,08	31,87	6,13
$p_{\text{máx}}$ [kPa]	Elemento 1	32,86	32,91	33,73	35,37	37,17	35,53	1,08
	Elemento 2	72,92	72,94	73,18	73,71	74,32	73,60	1,01
$q_{\text{máx}}/p_{\text{máx}}$	Elemento 1	0,24	0,24	0,33	0,57	0,93	1,34	5,58
	Elemento 2	0,07	0,07	0,10	0,17	0,31	0,43	6,14

Como demonstrado, é extremamente gravoso o aumento da velocidade de circulação, refletindo-se sobretudo no aumento da tensão de desvio. De facto, esta tensão apresenta um fator de aumento aproximadamente igual a seis, comparando as velocidades limite consideradas. No que diz respeito à tensão média, o aumento desta é pouco pronunciado, mantendo-se praticamente constante com as sucessivas variações de velocidade. Da conjugação destas duas evoluções distintas resulta um comportamento extremamente gravoso do ponto de vista geotécnico, uma vez que há uma rápida

aproximação das trajetórias de tensão da superfície de rotura, evidenciando-se a grande distorção que o solo sofre para velocidades muito elevadas.

É ainda curioso verificar as semelhanças no fator de amplificação dinâmica para a velocidade de 150 m/s, no que diz respeito aos valores da tensão de desvio e tensão média máximos nos dois elementos analisados. Realça-se ainda o facto de os valores de tensão média para uma velocidade de 140 m/s serem superiores aos obtidos considerando uma velocidade de 150 m/s. Tal facto ocorre devido à velocidade crítica ser inferior à propagação das ondas S no solo (considerada igual a 150 m/s) e, como tal, é natural que os valores das tensões atinjam um pico para uma velocidade ligeiramente inferior a esta, diminuindo seguidamente com novos aumentos de velocidade.

4.4.3. EVOLUÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE TENSÃO COM O AFASTAMENTO AO EIXO DE SIMETRIA

De modo a analisar as alterações ao estado de tensão para vários elementos a diferentes distâncias do eixo de simetria, apresenta-se uma série de estudos paramétricos, avaliando-se a evolução das trajetórias de tensão e os ciclos carga-descarga. Chama-se a atenção do leitor para o facto das trajetórias de tensão apresentadas de seguida considerarem apenas os incrementos de tensão provocados pela passagem de uma carga elementar, uma vez que os diferentes elementos ilustrados não ostentam o mesmo estado de tensão inicial e portanto, não permitiriam a uniformização dos resultados.

Os elementos analisados podem ser observados na Figura 4.18. Para um estudo mais generalista, efetuam-se as análises considerando três velocidades de circulação da carga distintas: i) 30 m/s; ii) 100 m/s; iii) 150 m/s.

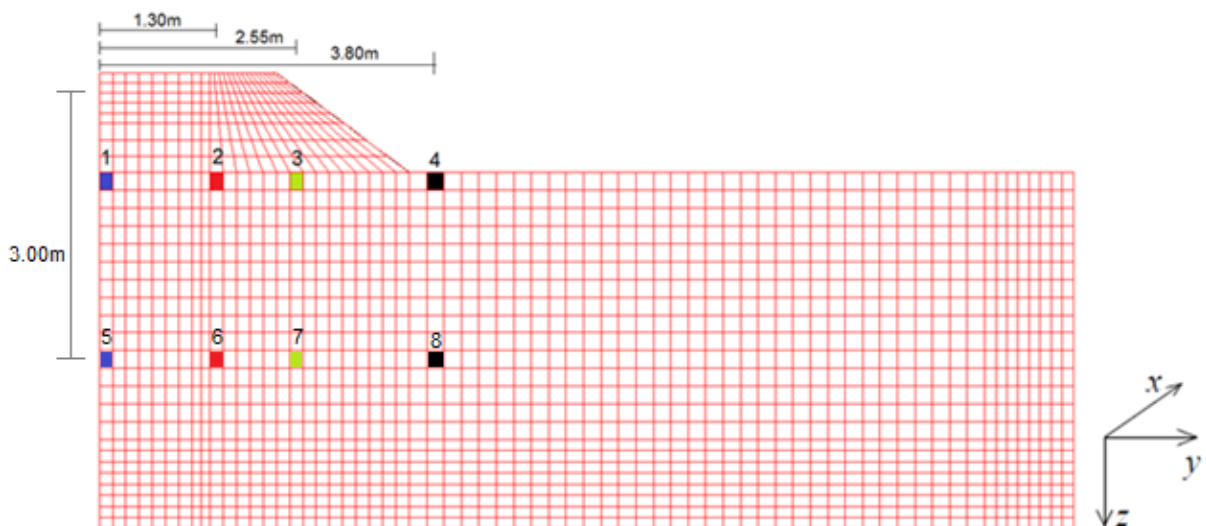


Figura 4.18 – Representação geométrica dos elementos em análise

Primeiramente analisem-se as Figuras 4.19 e 4.20, correspondentes às duas velocidades mais reduzidas apresentadas.

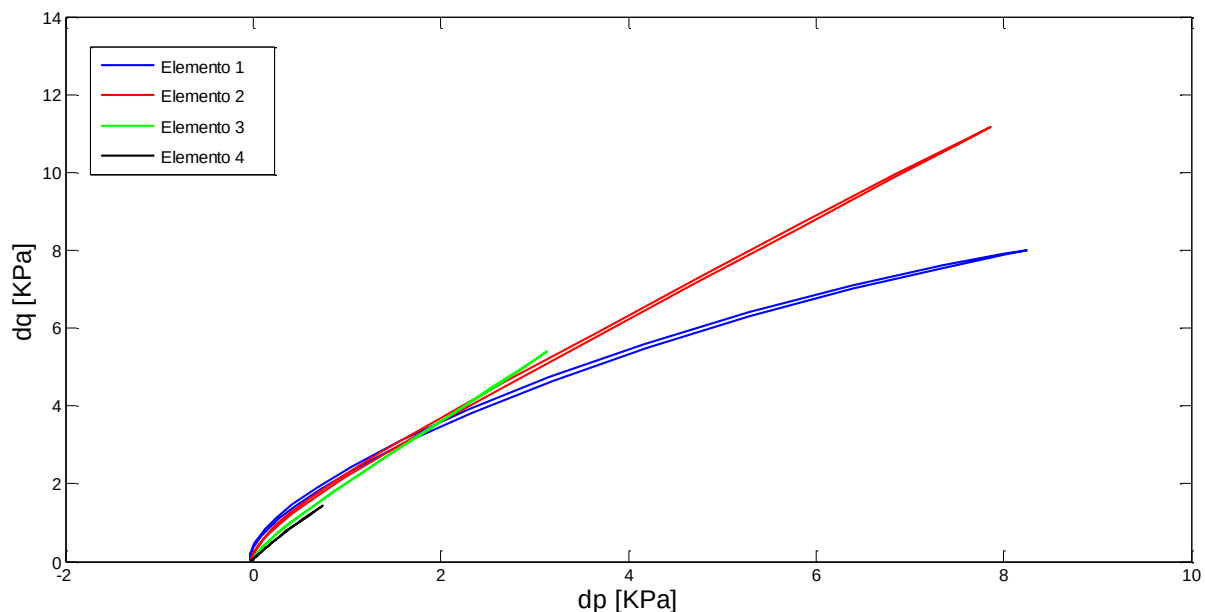


Figura 4.19 – Evolução das trajetórias de tensão com o afastamento ao eixo de simetria (Elementos superficiais; $V=30$ m/s)

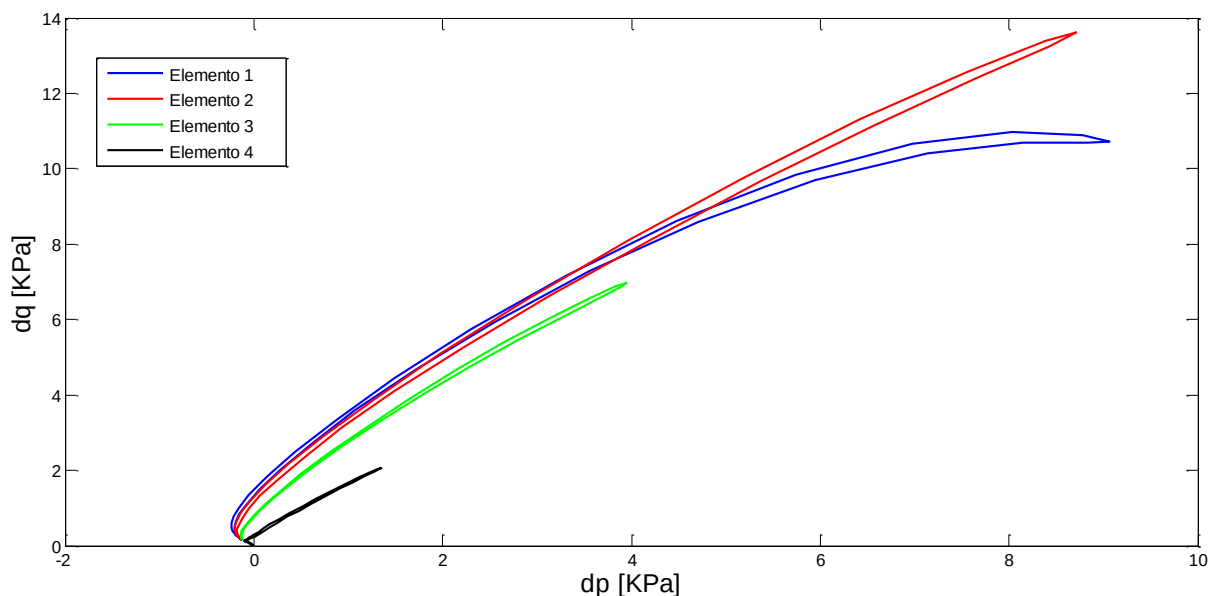


Figura 4.20 – Evolução das trajetórias de tensão com o afastamento ao eixo de simetria (Elementos superficiais; $V=100$ m/s)

De acordo com as figuras exibidas, a redução da tensão de corte e tensão média com o aumento da distância ao eixo de simetria é muito acentuada, excetuando-se o caso dos dois primeiros elementos, que devido à sua posição geométrica (Elemento 1 sob o eixo de simetria e Elemento 2 no enfiamento do carril), não seguem esta mesma tendência. De modo a sintetizar a informação constante nas figuras em análise, segue-se o Quadro 4.4, que indica a tensão de corte máxima para os diversos elementos e para ambas as velocidades, permitindo verificar que a redução desta tensão com o afastamento ao eixo da via é superior, em termos relativos, para a velocidade de 100 m/s.

Quadro 4.4 – Evolução dos incrementos de tensão de corte com o afastamento ao eixo.

		Velocidade [m/s]	
		30	100
Elemento 1	$dq_{m\acute{a}x}$ [kPa]	8.00	10.99
Elemento 2		11.16	13.61
Elemento 3		5.39	6.97
Elemento 4		1.43	2.07

Os ciclos carga-descarga também são facilmente perceptíveis em todas as trajetórias dos elementos analisados, para ambas as velocidades. Este facto mostra que os efeitos de amplificação dinâmica são displicentes nesta gama de velocidades, sendo o carácter dinâmico do problema devido apenas à variação temporal do carregamento.

Quando considerada uma velocidade de circulação muito elevada, de valor igual a 150 m/s, os efeitos de amplificação dinâmica já não podem ser desprezados, tal como ilustrado na Figura 4.21.

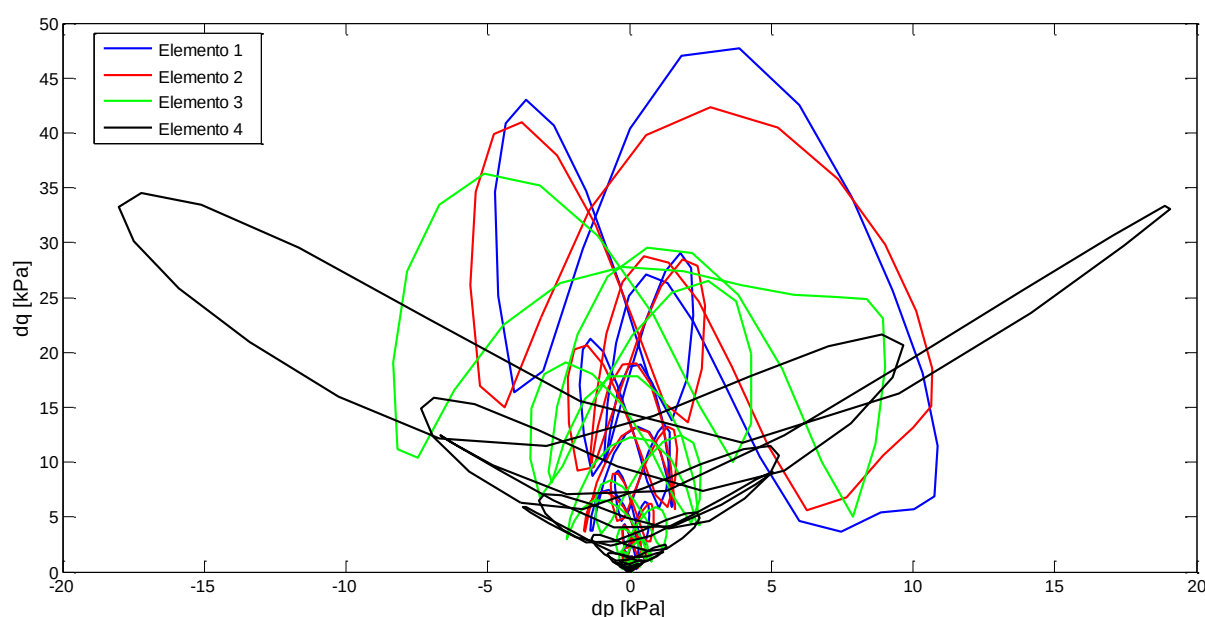


Figura 4.21 – Evolução das trajetórias de tensão com o afastamento ao eixo de simetria (Elementos superficiais; $V=150$ m/s)

Para velocidades desta ordem de grandeza as trajetórias de tensão apresentam um nível de complexidade muito elevado, tal como estudado anteriormente, notando-se um claro aumento, em valores absolutos, da tensão de corte face à tensão média. Esta discrepância entre estas duas tensões não se verificava para os níveis de velocidades analisados atrás. Outro aspeto interessante diz respeito ao fenómeno verificado na trajetória correspondente ao Elemento 4. Comparativamente com o que foi

verificado para velocidades inferiores, a redução da tensão de desvio e da tensão média não é tão pronunciada com o afastamento ao eixo, antes pelo contrário, verifica-se um aumento em termos de tensão média, com incrementos negativos e positivos, praticamente, de igual valor. Na tentativa de perceber se este comportamento contrastante ocorre devido à posição superficial do elemento em estudo ou, de uma forma mais geral, se encontra associado aos fenómenos de amplificação dinâmica que ocorrem para estas velocidades, observe-se a Figura 4.22, onde constam as trajetórias de tensão para os elementos a maior profundidade representados na Figura 4.18.

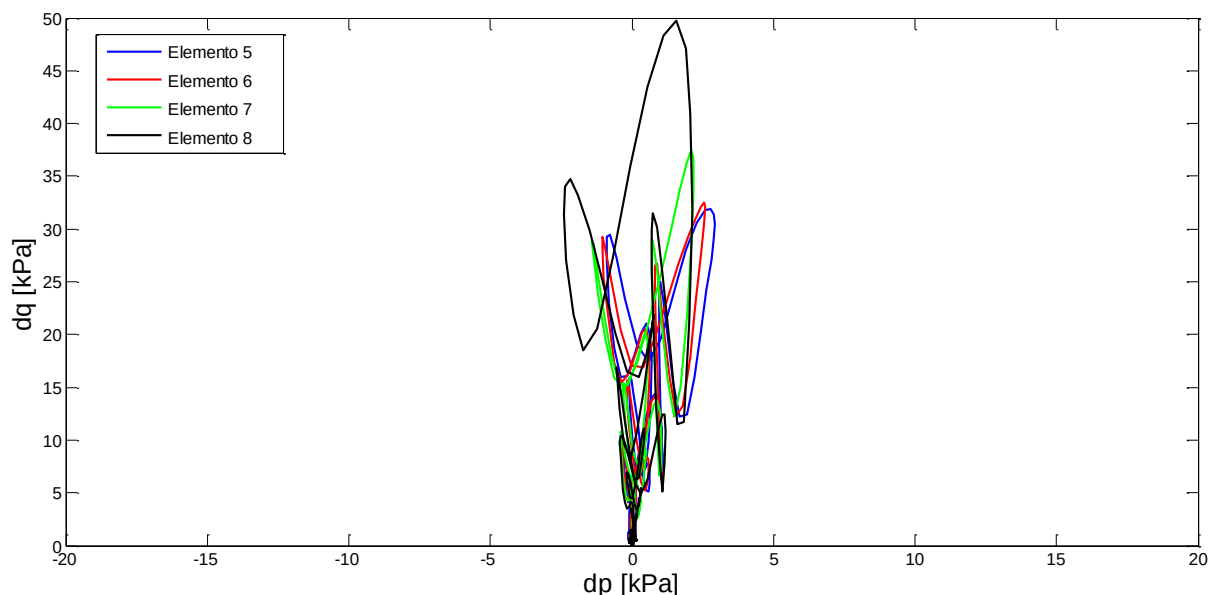


Figura 4.22 – Evolução das trajetórias de tensão com o afastamento ao eixo de simetria (Elementos a maiores profundidades; $V=150$ m/s)

As trajetórias de tensão apresentadas na figura em análise permitem concluir que os efeitos de amplificação dinâmica provocam a propagação de vibrações a maiores distâncias e com energia superior, mesmo em zonas mais profundas do maciço de fundação, sendo curioso verificar a elevada redução dos incrementos de tensão média ocorridos, comparativamente com os elementos mais superficiais, notando-se claramente este aspeto nos elementos mais afastado do eixo de simetria.⁷

A Figura 4.23 serve apenas para confirmar que para velocidades mais reduzidas ($V=100$ m/s), as trajetórias de tensão para os elementos a maiores profundidades seguem a mesma tendência verificada para os elementos mais superficiais, ou seja, há um decréscimo dos incrementos de tensão de corte e de tensão média em função do afastamento ao eixo da via.

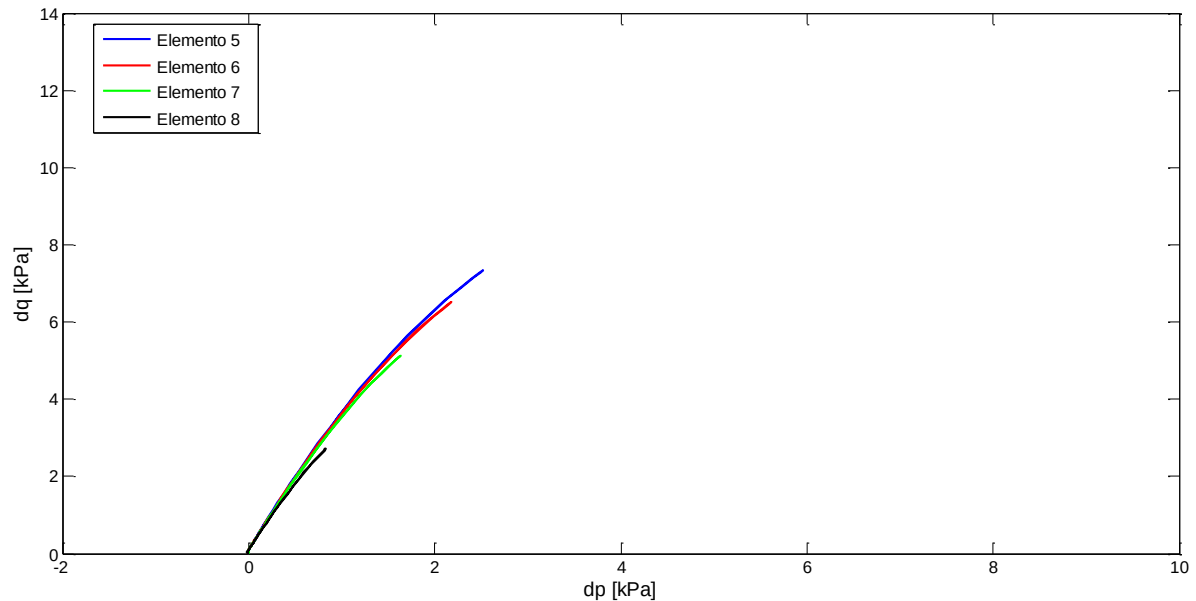


Figura 4.23 – Evolução das trajetórias de tensão com o afastamento ao eixo de simetria (Elementos a maiores profundidades; $V=100$ m/s)

As conclusões retiradas com a análise de velocidades muito elevadas ($V=150$ m/s) permitem alertar para as implicações que os fenómenos de amplificação dinâmica acarretam para as estruturas adjacentes à linha férrea, introduzindo perturbações para as pessoas e, em casos extremos, danos nas próprias estruturas. Embora se compreenda a pertinência destes problemas e a sua atualidade, o seu estudo encontra-se fora do âmbito da presente dissertação. Para um maior aprofundamento dos mesmos, recomenda-se a consulta dos trabalhos de François *et al* (2009) e Karg *et al* (2010), nos quais são retratados os processos referentes à acumulação de dano nos solos e a sua interferência nas estruturas adjacentes, devido à aplicação de uma dada solicitação dinâmica.

4.5. ESTUDO DAS ALTERAÇÕES NO ESTADO DE TENSÃO INDUZIDAS PELA CIRCULAÇÃO FERROVIÁRIA (MECANISMO QUASI-ESTÁTICO)

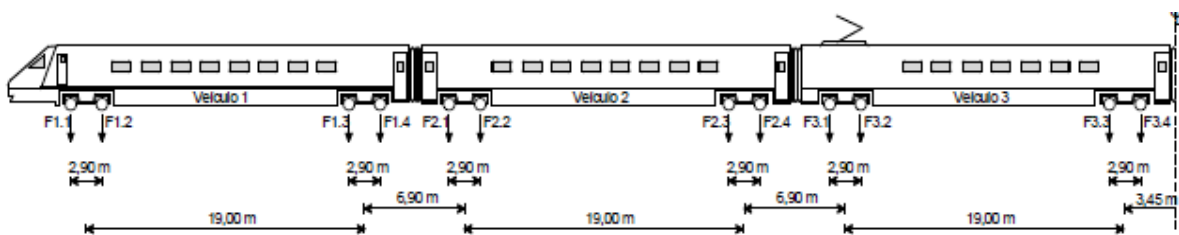
4.5.1. MODELAÇÃO DO COMBOIO ALFA-PENDULAR

Concluído o estudo referente à simulação da passagem de uma carga elementar, procura-se agora generalizar os casos estudados com a simulação da passagem do tráfego ferroviário. Nesta primeira fase, avalia-se apenas as alterações preconizadas pelo mecanismo de excitação quasi-estático, isto é, a solicitação imposta pelo material circulante à via-férrea engloba apenas a carga estática que cada eixo do comboio transmite à via, conforme descrito no capítulo anterior.

Tal estudo requer a simulação da passagem de um comboio, optando-se pela escolha do comboio Alfa-Pendular (Figura 4.24), o que possibilitou o usufruto das informações constantes em Alves Costa (2011) relativamente à geometria e às principais propriedades mecânicas de interesse para o modelo numérico.



a)



b)

Figura 4.24 – Comboio Alfa-Pendular: a) Fotografia (CP, 2012); b) Geometria do comboio (Alves Costa, 2011).

Conforme representado na Figura 4.24 o comboio em estudo apresenta um plano de simetria e é composto por um total de seis veículos. O Quadro 4.5 traduz as cargas que cada eixo transmite ao carril e que são adotadas no modelo numérico.

Quadro 4.5 – Cargas transmitidas por eixo do comboio Alfa-Pendular.

	Veículo 1	Veículo 2	Veículo 3	Veículo 4	Veículo 5	Veículo 6
Eixo 1 (Fi.1)	133,30	135,70	131,50	135,50	135,70	132,70
Eixo 2 (Fi.2)	136,80	139,20	131,50	135,50	139,23	136,70
Eixo 3 (Fi.3)	136,20	139,20	131,50	135,50	139,23	136,70
Eixo 4 (Fi.4)	132,70	135,70	131,50	135,50	135,70	133,30

Seguidamente serão apresentados os estudos paramétricos das alterações ao estado de tensão ocorridas aquando da passagem do comboio Alfa-Pendular.

4.5.2. EVOLUÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE TENSÃO EM PROFUNDIDADE

No seguimento dos estudos paramétricos efetuados na análise às alterações do estado de tensão devido à simulação da passagem de uma carga elementar, analisa-se a evolução das trajetórias de tensão em profundidade considerando a passagem do comboio Alfa-Pendular. Para tal estudo, considera-se a análise referente aos elementos do maciço da fundação, indicados na Figura 4.4.

Antes de se apresentarem as trajetórias de tensão devidas à passagem do comboio referido, atenda-se à Figura 4.25, onde se podem observar a totalidade das tensões normais e tangenciais no domínio do tempo para uma velocidade de 30 m/s, correspondentes aos Elementos 1 e 4 indicados na Figura 4.4. Nestes gráficos considera-se que no instante $t=0$ s o último eixo do comboio encontra-se sobre a secção de referência e, como tal, as alterações ao estado de tensão são representadas nos tempos negativos.

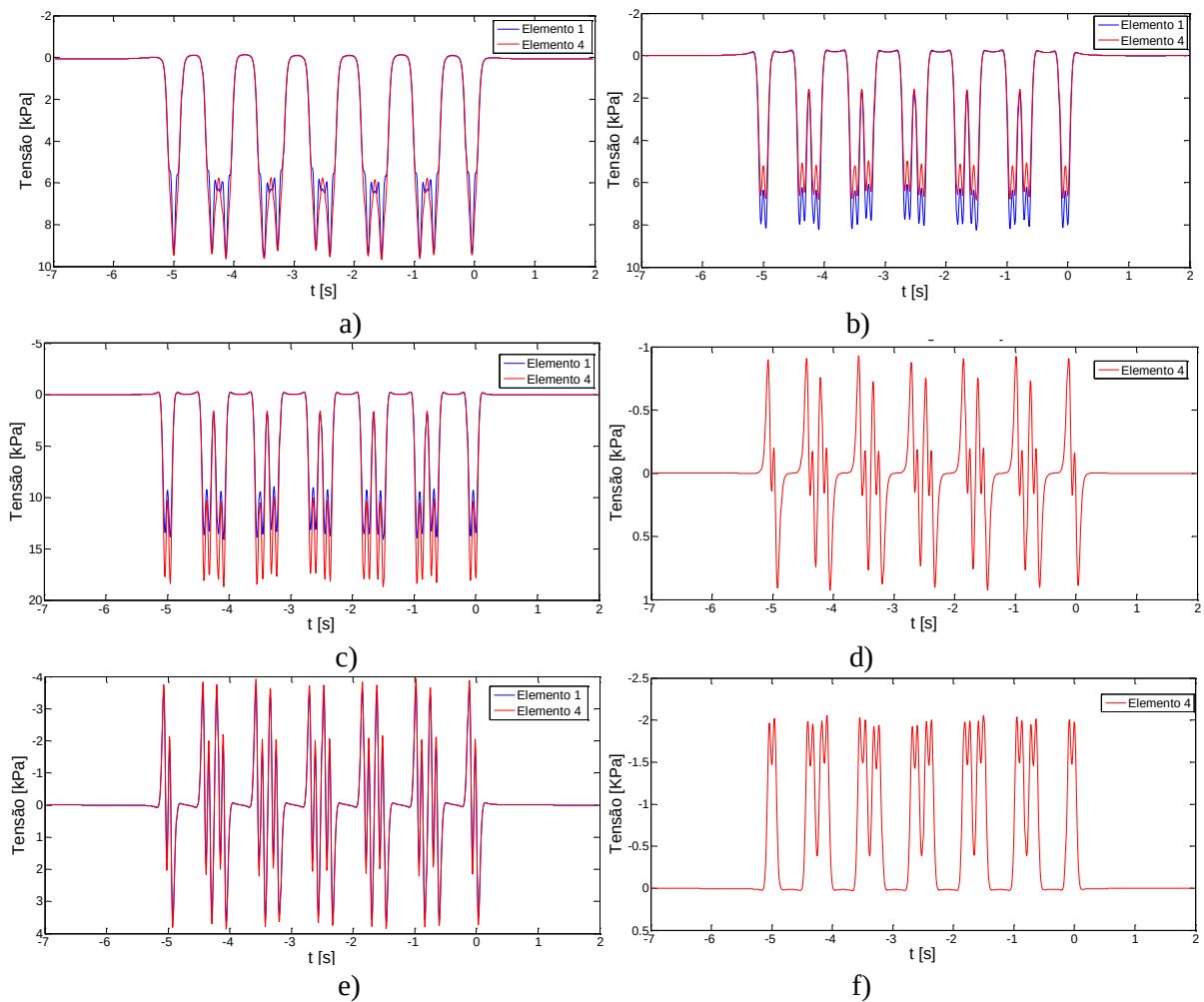


Figura 4.25 – Representação, em função do tempo, das alterações do estado de tensão preconizadas pela passagem do comboio Alfa-Pendular à velocidade de 30m/s: a) Tensão normal σ_x ; b) Tensão normal σ_y ; c) Tensão normal σ_z ; d) Tensão tangencial τ_{xy} ; e) Tensão tangencial τ_{xz} ; f) Tensão tangencial τ_{yz} .

Como é possível observar na Figura 4.25, as alterações do estado de tensão em ambos os elementos são similares, isto levando em consideração que o Elemento 1 se situa no plano de simetria e como tal

as tensões tangenciais τ_{xy} e τ_{yz} são nulas, diferindo assim, das encontradas no Elemento 4. Mas o aspeto mais interessante desta figura diz respeito à forma das curvas para as várias tensões. De facto, analisando as várias tensões normais é possível concluir que os picos das respetivas curvas estão em correspondência com a geometria dos vários eixos do comboio. Na mesma linha de pensamento, também se conseguem distinguir os vários eixos do comboio com a análise das curvas referentes às tensões tangenciais, notando-se as sucessivas rotações das direções de tensão principal com a passagem dos vários eixos.

A Figura 4.26 evidencia as trajetórias de tensão obtidas com a simulação da passagem do comboio Alfa-Pendular, anteriormente apresentado, para os elementos presentes no alinhamento 1 da Figura 4.4.

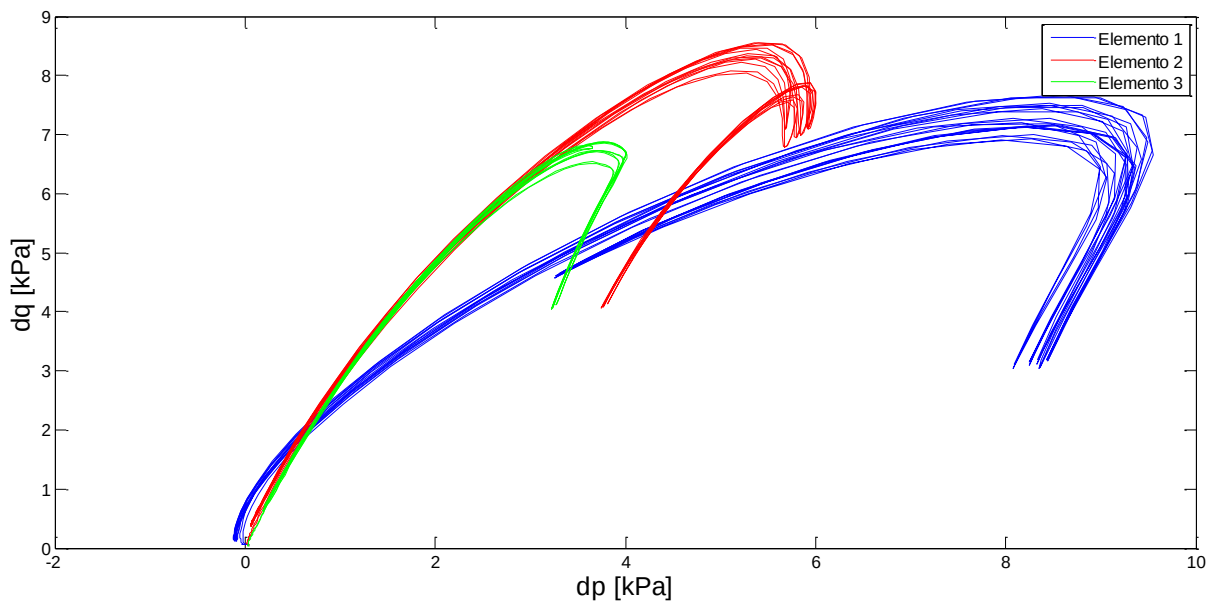


Figura 4.26 – Evolução das trajetórias de tensão em profundidade com a passagem do comboio Alfa-Pendular (alinhamento 1, V=30 m/s).

Como é possível notar estas trajetórias apresentam um nível de complexidade bastante superior àquelas obtidas com a simulação da passagem de uma carga elementar. Assim, de modo a simplificar a interpretação das mesmas, simula-se a passagem de algumas partes do comboio isoladas. Inicialmente, apresenta-se as trajetórias correspondentes à passagem dos dois primeiros eixos do comboio (um bogie), seguindo-se a simulação da passagem do primeiro veículo (quatro eixos) e por fim, as trajetórias correspondentes à passagem de dois veículos completos.

A Figura 4.27 representa as trajetórias de tensão associadas à passagem dos dois primeiros eixos do comboio, onde se pode observar o padrão carga-descarga associado.

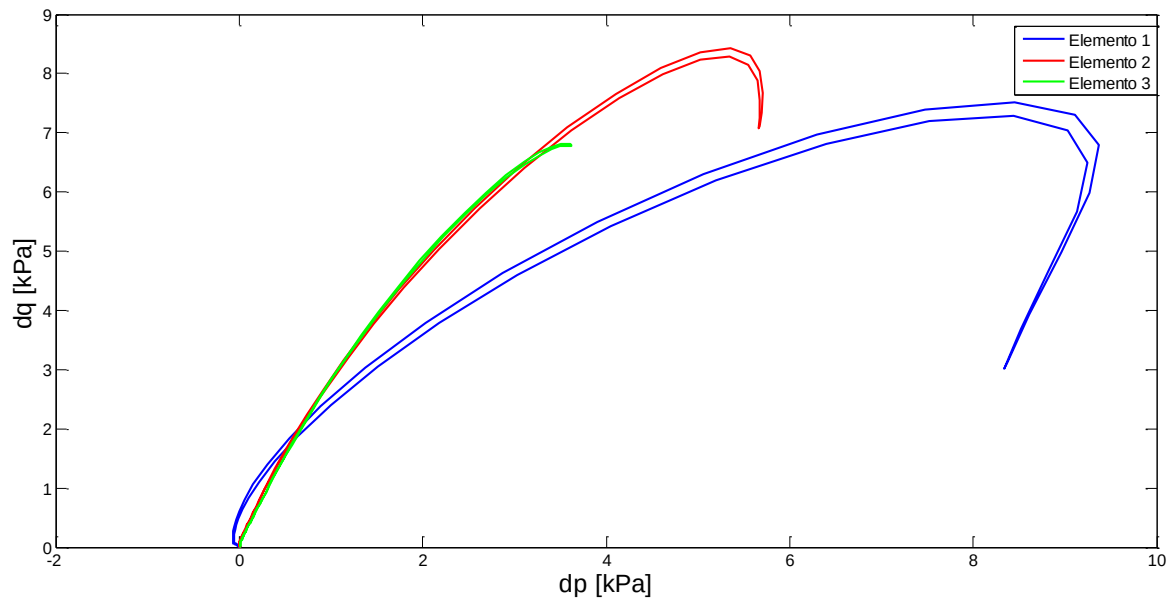


Figura 4.27 – Evolução das trajetórias de tensão em profundidade com a passagem dos dois primeiros eixos do comboio (alinhamento 1, $V=30$ m/s).

Como se pode observar há um comportamento característico das trajetórias representadas, notando-se um crescimento da tensão de corte incremental (dq), correspondente à passagem do primeiro eixo. Após a passagem deste, há uma espécie de alívio em que a tensão de desvio tem uma queda, de maior significância para os elementos mais próximos da superfície. Porém, como o segundo eixo se encontra próximo do primeiro não há uma descarga completa, até porque, como se pode observar, a redução da tensão média (dp) é pequena ou mesmo inexistente. Quando o segundo eixo passa sobre o elemento, observa-se um novo incremento de tensão de corte, atingindo-se de novo um máximo. À medida que este se afasta da secção em estudo, há uma descarga completa das trajetórias de tensão.

Chama-se a atenção do leitor que o facto da diminuição da tensão de desvio, após a passagem do primeiro eixo, ser mais significativa nos elementos mais próximos da superfície, conforme referido, resulta da degradação das tensões em profundidade. Este facto tem como consequência a não distinção dos eixos pertencentes a um dado bogie por estes se encontrarem relativamente próximos, tal como representado na Figura 4.28 para o elemento a maior profundidade. Assim, o ciclo carga-descarga associado aos dois eixos não apresenta uma redução da tensão de desvio tão evidente como a evidenciada nos elementos mais à superfície.

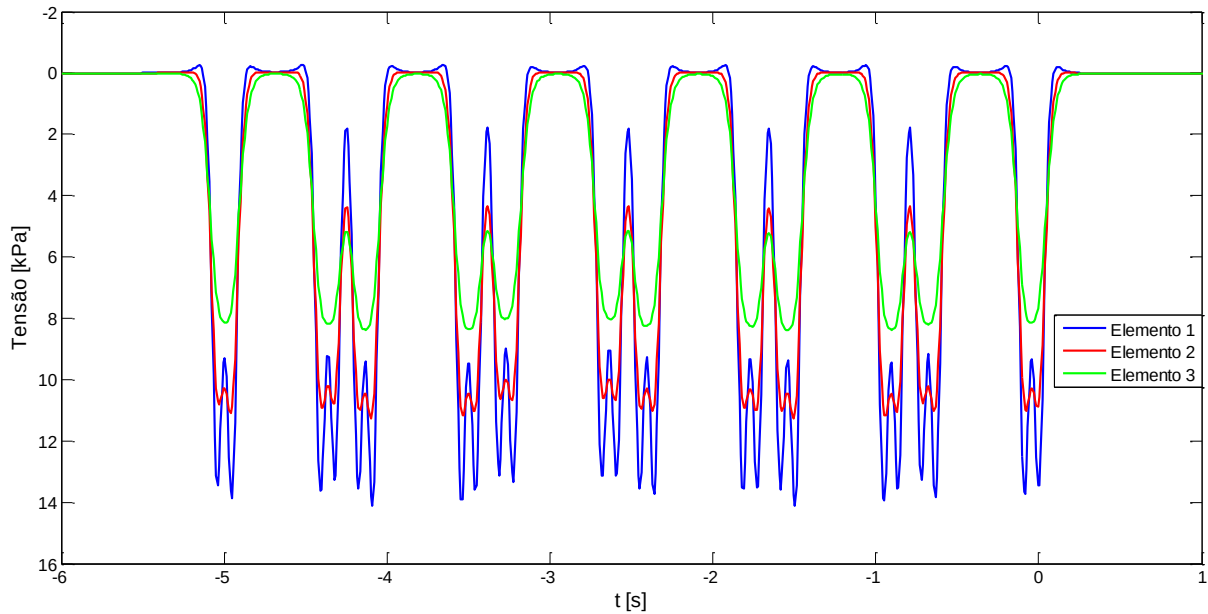


Figura 4.28 – Evolução da tensão normal σ_z em profundidade (alinhamento 1, $V=30\text{m/s}$).

A Figura 4.29 apresenta as trajetórias de tensão referentes à simulação da passagem de um veículo completo do comboio (quatro eixos, divididos em dois bogies).

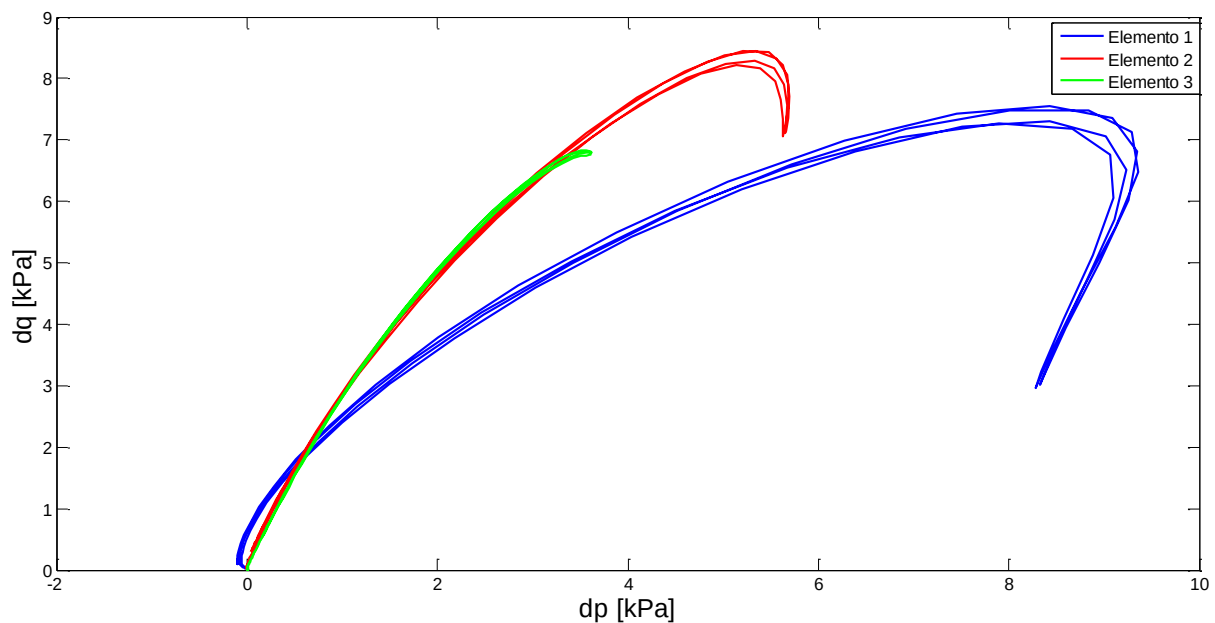


Figura 4.29 – Evolução das trajetórias de tensão em profundidade com a passagem do primeiro veículo do comboio (alinhamento 1, $V=30\text{ m/s}$).

Como se pode observar na Figura 4.29, as principais diferenças que se notam em relação à Figura 4.27 resumem-se, praticamente, a haver um novo ciclo de carga-descarga, correspondente à simulação da passagem do segundo bogie do primeiro veículo. Esta observação permite constatar que o afastamento dos dois bogies considerados é suficientemente elevado para que não tenham influência um no outro, em termos de alterações do estado de tensão, para a velocidade considerada.

Já quando se simula a passagem das duas primeiras carruagens, as trajetórias de tensão apresentam um novo padrão, como se pode observar na Figura 4.30.

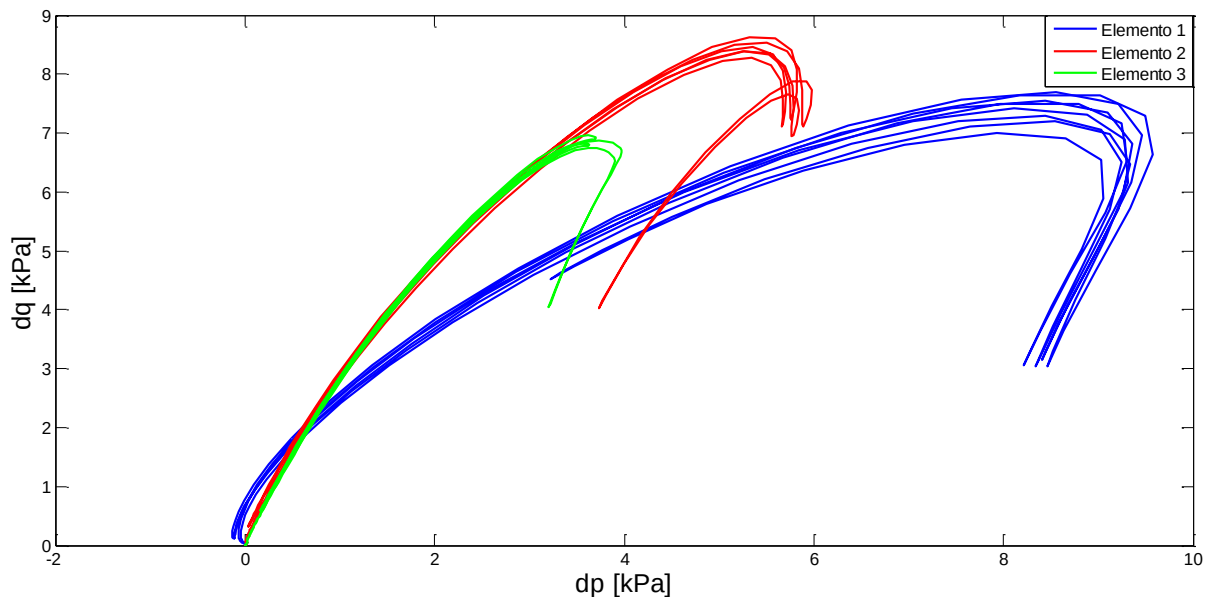


Figura 4.30 – Evolução das trajetórias de tensão em profundidade com a passagem dos dois primeiros veículos do comboio (alinhamento 1, $V=30$ m/s).

Nesta figura, pode observar-se que entre a passagem do fim do primeiro veículo e os dois primeiros eixos do segundo, as trajetórias de tensão exibem um comportamento diferente do que foi observado até então. De facto, é nesta transição entre carruagens do comboio que surge um desvio do padrão de comportamento observado anteriormente, ou seja, a geometria do comboio é um fator fulcral na forma dos ciclos carga-descarga.

O ciclo de carga e descarga associado aos dois primeiros eixos do segundo veículo apresenta muitas particularidades, verificando-se uma mudança significativa do padrão em profundidade e na forma do ciclo carga-descarga associado à passagem deste bogie. A interferência causada nas trajetórias de tensão deve-se à posição geométrica dos eixos em questão. De facto a posição próxima entre os bogies dos dois veículos faz com que a trajetória correspondente à passagem do último bogie da primeira carruagem não apresente um ciclo carga-descarga completo, com uma considerável redução da tensão de desvio para os elementos a maiores profundidades.

Face às exposições efetuadas anteriormente, é agora mais facilmente discernida a Figura 4.26, a qual representa as trajetórias de tensão implícitas à passagem da totalidade do comboio Alfa-Pendular, cuja geometria foi apresentada anteriormente. Comparando as trajetórias de tensão referentes à simulação da passagem do comboio por completo e as obtidas com a simulação da passagem de apenas duas carruagens, conclui-se que as primeiras apresentam a mesma configuração das segundas, com a particularidade de ostentarem uma repetição dos ciclos de carga-descarga em virtude do número de veículos constituintes do comboio. Assim, pode-se concluir que a análise da passagem de dois veículos é suficiente para a obtenção da forma completa das trajetórias de tensão, isto no caso de se considerar a geometria do comboio Alfa-Pendular.

4.5.3. EVOLUÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE TENSÃO COM A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE

A segunda análise às alterações do estado de tensão preconizadas pela passagem de um comboio, neste caso concreto o Alfa-Pendular, diz respeito ao estudo da influência que a velocidade de circulação acarreta nas trajetórias de tensão.

No seguimento dos estudos efetuados relativos à influência da velocidade de circulação nas trajetórias de tensão com a simulação da passagem de uma carga elementar, tomam-se as mesmas velocidades de circulação e os mesmos elementos testados na análise que se segue, relativa à simulação da passagem do comboio Alfa-Pendular. As hipóteses admitidas para a linha de rotura são igualmente adotadas no caso em estudo, referindo-se uma vez mais o carácter indicativo desta linha, conforme explicado anteriormente.

As Figuras 4.31 e 4.32 apresentam as referidas trajetórias de tensão para os Elementos 1 e 2, respetivamente (ver Figura 4.14). Como já verificado na simulação da passagem de uma carga elementar sobre o carril, o estado de tensão inicial é determinante para se atingir ou não a envolvente de rotura. Assim, os elementos a maiores profundidades, como o caso do Elemento 2, dificilmente “plastificam”, na gama de velocidades testadas.

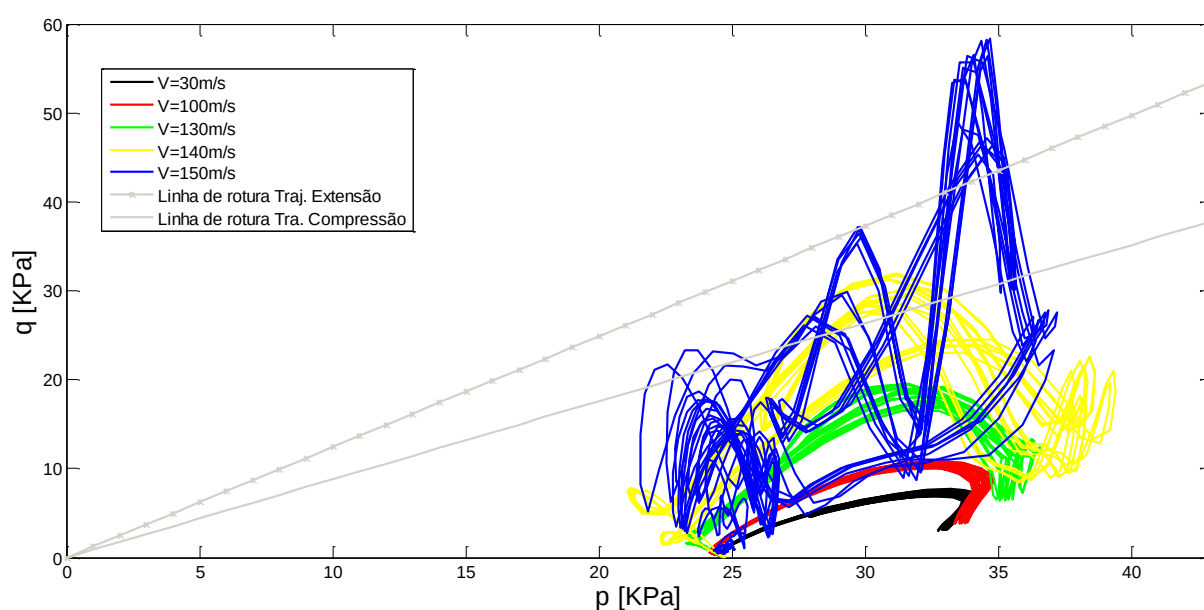


Figura 4.31 – Evolução das trajetórias de tensão para diferentes velocidades de circulação do comboio Alfa-Pendular (Elemento 1).

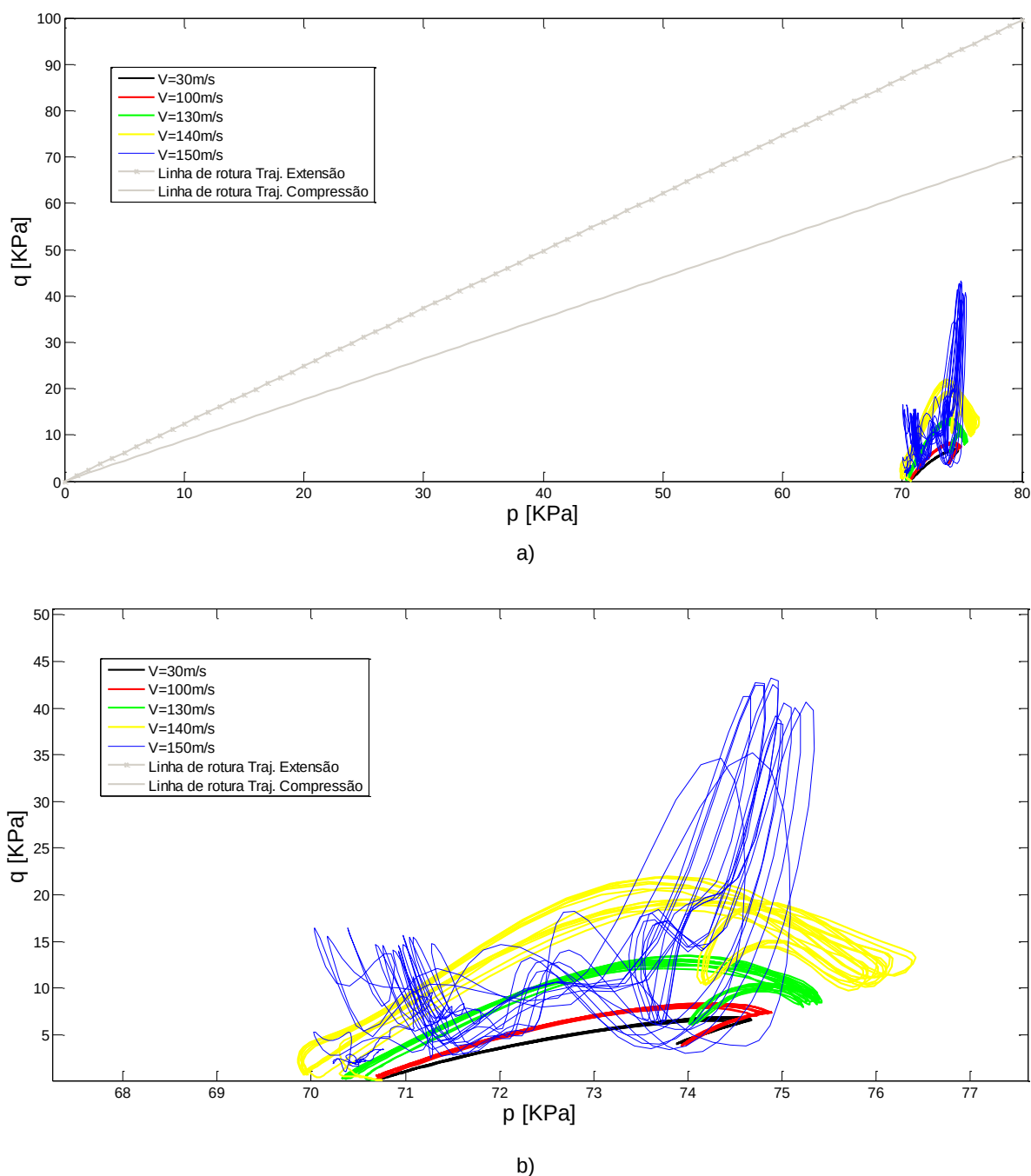


Figura 4.32 – Evolução das trajetórias de tensão para diferentes velocidades de circulação do comboio Alfa-Pendular (Elemento 2): a) Vista geral; b) Vista de pormenor.

Para velocidades afastadas da velocidade crítica, a forma das trajetórias de tensão é em tudo semelhante às discutidas no ponto correspondente à evolução em profundidade das mesmas, sendo notório os ciclos de carga-descarga. A partir do momento em que se começa a aproximar da velocidade crítica começam a surgir comportamentos contrastantes com o padrão verificado no ciclo carga-descarga, não sendo mais possível a identificação dos mesmos.

Procurando explicações para este facto, é de extrema importância verificar o que se passa ao nível das tensões normais e tangenciais durante a passagem do comboio. Repare-se nas Figuras 4.33 e 4.34 que representam a tensão normal σ_z e a tensão tangencial τ_{xz} para as velocidades de 30m/s e 150m/s, respetivamente, no domínio do tempo.

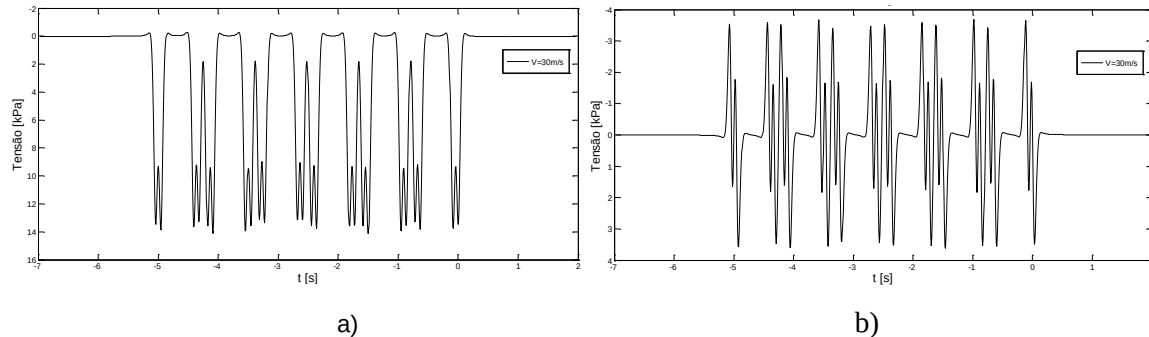


Figura 4.33 – Tensões no Elemento 1, em função do tempo, considerando V=30m/s: a) Tensão normal σ_z ; b) Tensão tangencial τ_{xz} .

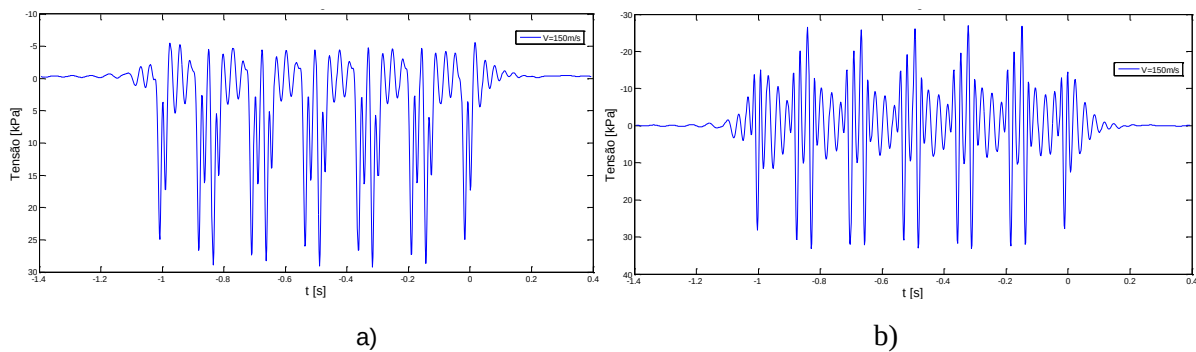


Figura 4.34 – Tensões no Elemento 1, em função do tempo, considerando V=150m/s: a) Tensão normal σ_z ; b) Tensão tangencial τ_{xz} .

Nestas figuras é notório o efeito dinâmico induzido na circulação com velocidade próxima da velocidade crítica, observando-se a propagação de ondas com a passagem do comboio. A ocorrência destes fenómenos dinâmicos para estas velocidades é a principal razão para a complexidade adicional que se verifica nas trajetórias de tensão. Para velocidades mais reduzidas, o carácter dinâmico do problema deve-se apenas à variação temporal da posição geométrica do carregamento e como tal, os efeitos de amplificação dinâmicos tornam-se displicentes.

Sintetizando, é possível retirar algumas ilações dos estudos paramétricos efetuados: i) as alterações do estado de tensão verificadas são mais pronunciadas para maiores velocidades; ii) o acréscimo da velocidade de circulação acarreta a geração de efeitos dinâmicos que se traduzem num aumento significativo na tensão de corte; iii) a configuração das trajetórias de tensão sofre profundas alterações, aumentando o nível de complexidade da sua análise, com o aumento da velocidade.

4.5.4. EVOLUÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE TENSÃO COM O AFASTAMENTO AO EIXO DE SIMETRIA

Uma vez mais se efetuam estudos paramétricos para avaliar a evolução das trajetórias de tensão de vários elementos dispostos a diferentes distâncias do eixo de simetria, conforme representados na Figura 4.18. Nesta análise, ao invés da consideração de uma carga elementar com movimento ao longo da direção longitudinal do desenvolvimento da via, considera-se a passagem do comboio Alfa-Pendular. As Figuras 4.35 e 4.36 apresentam a evolução das referidas trajetórias para velocidades de 30 m/s e 100 m/s, respetivamente, considerando os elementos de análise os presentes na Figura 4.18.

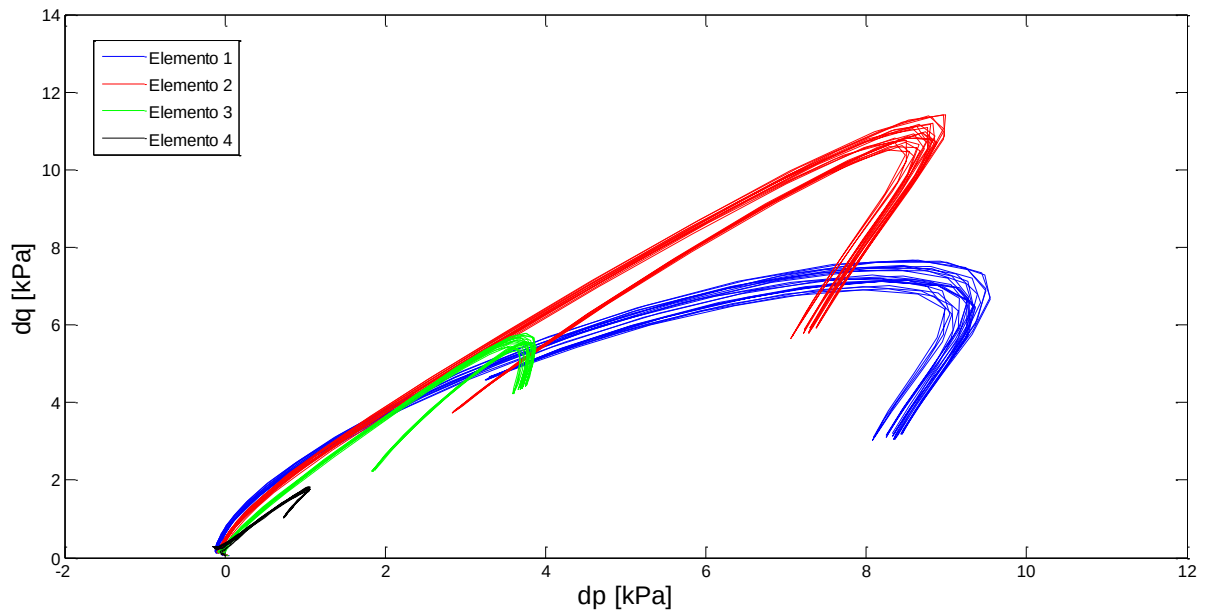


Figura 4.35 – Evolução das trajetórias de tensão com o afastamento ao eixo da via devido à passagem do comboio ($V=30\text{m/s}$).

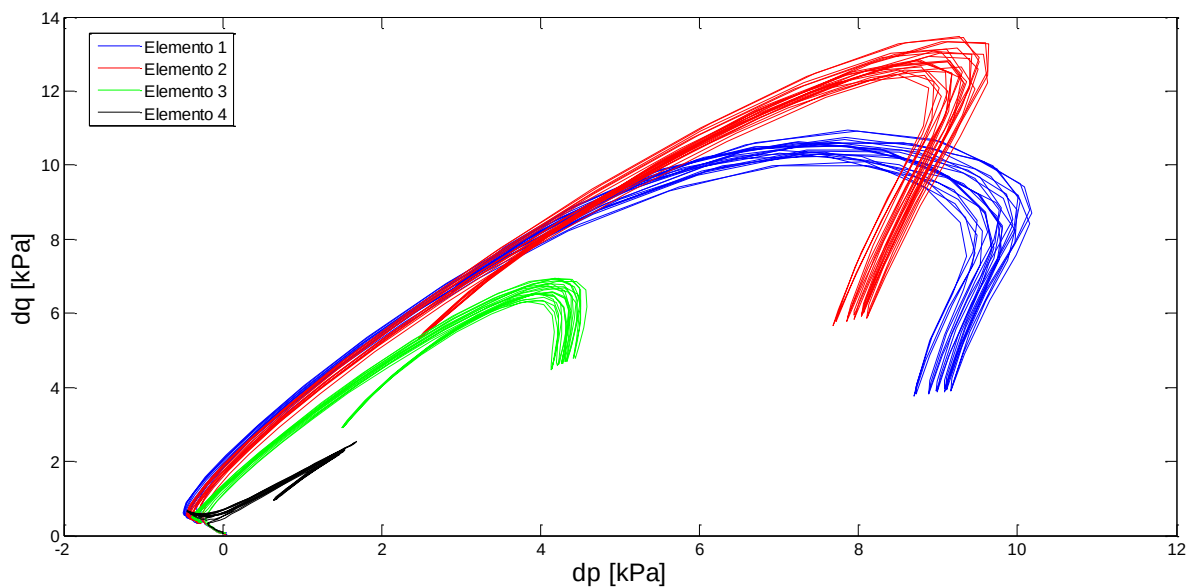


Figura 4.36 – Evolução das trajetórias de tensão com o afastamento ao eixo da via devido à passagem do comboio ($V=100\text{m/s}$).

O comportamento evidenciado com a simulação da passagem do comboio é o mesmo que se verifica na passagem de apenas uma carga elementar, como seria de esperar, notando-se uma clara redução quer das tensões de desvio quer das tensões de corte, para os elementos mais afastados do eixo da via. A exceção verifica-se no Elemento 2, situado no alinhamento vertical do carril, apresentando um pico de tensões de desvio superior ao elemento sob o eixo da via (Elemento 1), apesar de o ponto máximo das tensões médias ser inferior, devendo-se essencialmente ao facto de o nível de distorção que se verifica nestas zonas ser superior, conforme já constatado em outras ocasiões.

Uma vez mais apresentam-se os valores da tensão de desvio máxima verificada em cada elemento e nas duas velocidades consideradas (Quadro 4.6). Notando-se, à semelhança do que foi verificado na simulação da passagem da carga elementar, a acentuada atenuação verificada para os elementos mais afastados e o aumento desta com a velocidade, tudo isto para velocidades em que o efeito das amplificações dinâmicas é displicente. Para velocidades muito elevadas, onde estes efeitos se tornam assinaláveis, verifica-se o mesmo comportamento evidenciado no estudo da carga elementar, não sendo representadas as respetivas trajetórias de tensão pois, face à complexidade das mesmas, sobrecarregariam de tal forma a figura, não permitindo a sua distinção para os vários elementos.

Quadro 4.6 – Variação da tensão de corte máxima com o afastamento ao eixo.

		Velocidade [m/s]	
		30	100
Elemento 1	qmáx [Kpa]	7,68	10,94
Elemento 2		11,43	13,48
Elemento 3		5,79	6,95
Elemento 4		1,83	2,54

Para concluir, sublinha-se que a partir da análise efetuada observa-se a manutenção do formato das trajetórias de tensão em todos os elementos analisados, mesmo nos mais afastados ao eixo da via, isto para velocidades na mesma gama das analisadas, uma vez que ao atingirem-se velocidades muito elevadas a complexidade das trajetórias é bastante superior devido aos fenómenos dinâmicos, conforme já devidamente estudado anteriormente.

4.6. ESTUDO DAS ALTERAÇÕES NO ESTADO DE TENSÃO PRECONIZADAS PELO MECANISMO DE EXCITAÇÃO DINÂMICO

4.6.1. OBJETIVOS DO ESTUDO E ASPETOS ESPECÍFICOS DA MODELAÇÃO

À semelhança dos estudos paramétricos realizados anteriormente, pretende-se a partir de agora avaliar a influência do mecanismo de excitação dinâmico na resposta dada pelo maciço de fundação com a passagem de tráfego ferroviário.

A fonte de geração de forças dinâmicas entre o veículo e a via, admitida no presente estudo, está ligada à presença de irregularidades ao longo do carril, conforme representado na Figura 4.37. Estas serão as responsáveis pela geração de forças dinâmicas, provocando alterações no estado de tensão. É o grau de influência destas alterações, comparativamente com as verificadas para uma situação quasi-estática da passagem do comboio, que se pretende avaliar, admitindo-se para tal, vários cenários de análise. A conjugação da variação da velocidade de circulação do comboio, a variação da frequência de oscilação da carga e a amplitude das irregularidades permite uma vasta gama de análises e verificar as tendências que ocorrem.

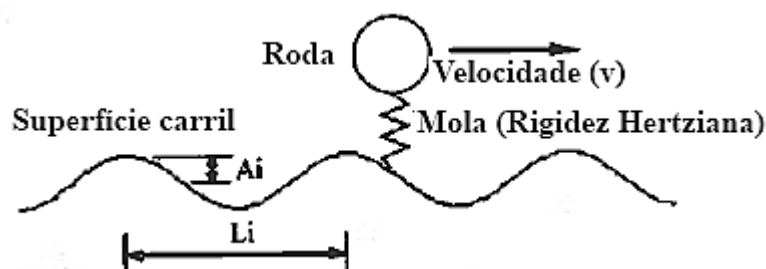


Figura 4.37 – Idealização das irregularidades do carril e interação roda-carril (Adaptado de Yang *et al*, 2009).

Antes de se iniciar a exposição correspondente aos estudos paramétricos, apresentam-se as hipóteses admitidas na modelação do perfil de irregularidades do carril (Figura 4.37). Para a sua modelação recorreu-se à utilização de uma curva sinusoidal, que em notação complexa apresenta a seguinte forma:

$$y_i(x) = A_i e^{ik_i x} \quad (5.1)$$

Onde A_i corresponde à amplitude da irregularidade e k_i ($k_i = 2\pi/L_i$) é o número de onda (L_i é o comprimento de onda). Neste estudo optou-se pela investigação de seis perfis de irregularidades, apresentados no Quadro 4.7, cobrindo o intervalo típico de variações da geometria do carril conforme estudos realizados por Selig and Waters (1994) e apresentados em Yang *et al* (2009). É de salientar que na realidade o perfil de irregularidades de uma qualquer via-férrea é de uma complexidade incomparavelmente superior, conforme se pode comprovar em Alves Costa (2011). No entanto, para a sua modelação estes perfis são decompostos numa sequência de funções sinusoidais e assim, justifica-se a simplificação efetuada.

Quadro 4.7 – Características dos perfis de irregularidades admitidos.

	L_i [m]	A_i [mm]
Perfil 1	30	5
Perfil 2	15	3,5
Perfil 3	7,5	2,5
Perfil 4	3,75	1,5
Perfil 5	1,5	0,3
Perfil 6	0,75	0,15

Relativamente às características do veículo necessárias à modelação, estas podem ser encontradas no Quadro 4.8. É de salientar que uma vez mais as características apresentadas dizem respeito ao comboio Alfa-Pendular (ver Figura 4.24) e foram obtidas através da consulta de Alves Costa (2011).

Quadro 4.8 – Características mecânicas do comboio Alfa-Pendular.

			Veículo 1	Veículo 2	Veículo 3	Veículo 4	Veículo 5	Veículo 6
Roda	Eixo 1	M_r [kg]	1538	1538	1538	1538	1538	1538
	Eixo 2		1884	1884	1538	1538	1884	1884
	Eixo 3		1884	1884	1538	1538	1884	1884
	Eixo 4		1538	1538	1538	1538	1538	1538
Suspensão Primária	Rigidez	K_p [kN/m]	3420					
	Amortecimento	C_p [kNs/m]	36					
Bogie	B1	M_b [kg]	4932	4823	4712	4712	4823	4823
		J_b [kg.m ²]	5150	5090	5000	5000	5090	5150
	B2	M_b [kg]	4823	4823	4712	4712	4823	4923
		J_b [kg.m ²]	5150	5090	5000	5000	5090	5150
Suspensão Secundária	Rigidez	K_s [kN/m]	1419					
	Amortecimento	C_s [kNs/m]	36					
Caixa		M_c [kg]	37301	38390	37024	38624	38496	37300
		J_c [kg.m ²]	77000	77000	77000	77000	77000	77000

Apresentam-se ainda na Figura 4.37 os primeiros quatro modos de vibração do terceiro veículo do comboio Alfa-Pendular e as correspondentes frequências naturais, assumindo-se um suporte rígido no contacto entre a via e o veículo. Conforme evidenciado, os dois primeiros modos estão apenas relacionados com o movimento da caixa do comboio e os restantes são devidos à movimentação dos bogies e a pequenos movimentos da caixa. Para além das frequências naturais apresentadas, há a referir que a frequência natural das massas não suspensas apresenta um valor de 63 Hz. (Alves Costa *et al*, 2012).

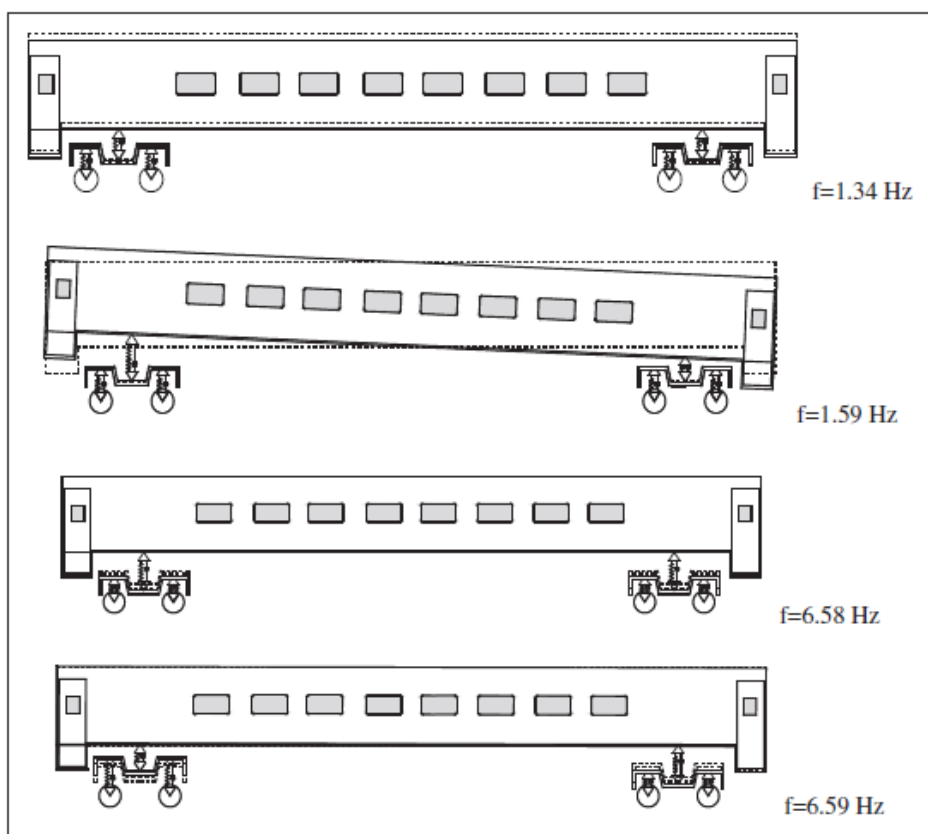


Figura 4.37 – Formas modais não amortecidas e frequências naturais do comboio Alfa-Pendular (Alves Costa *et al*, 2012)

4.6.2. INFLUÊNCIA DO DETALHE DE MODELAÇÃO DO MATERIAL CIRCULANTE

No presente ponto pretende-se realizar uma avaliação sumária da pertinência da modelação das massas suspensas (caixas do comboio) na análise às alterações do estado de tensão provocadas pelo mecanismo de excitação dinâmico. Assim, efetuaram-se dois estudos: i) estudo que contempla a modelação de apenas as massas não suspensas e semi-suspensas (eixos e bogies, respetivamente); ii) estudo em que se acrescenta a modelação das massas suspensas (caixas). Para esta investigação considere-se os resultados relativos ao elemento do solo identificado pelo número 1, na malha de elementos finitos presente na Figura 4.38.

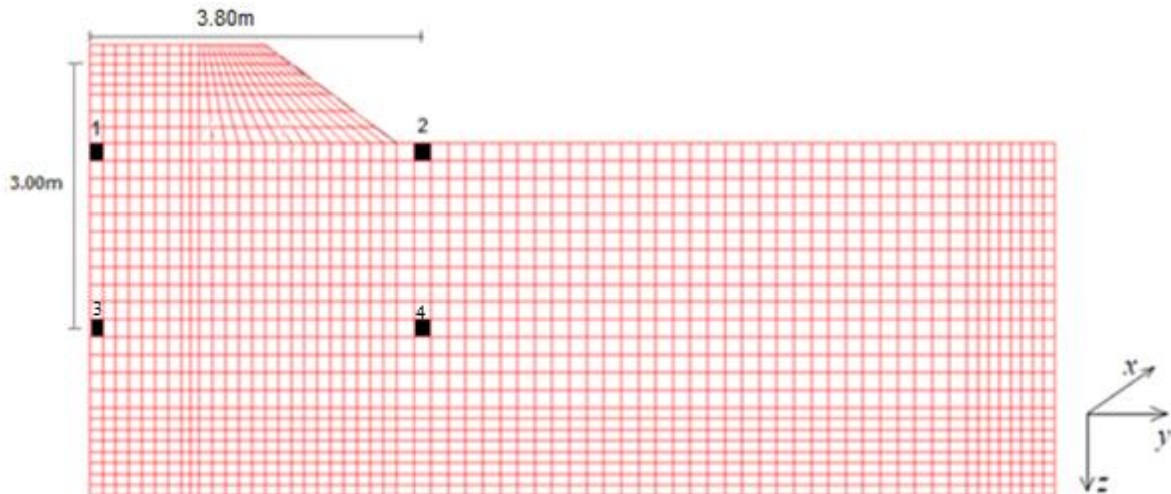
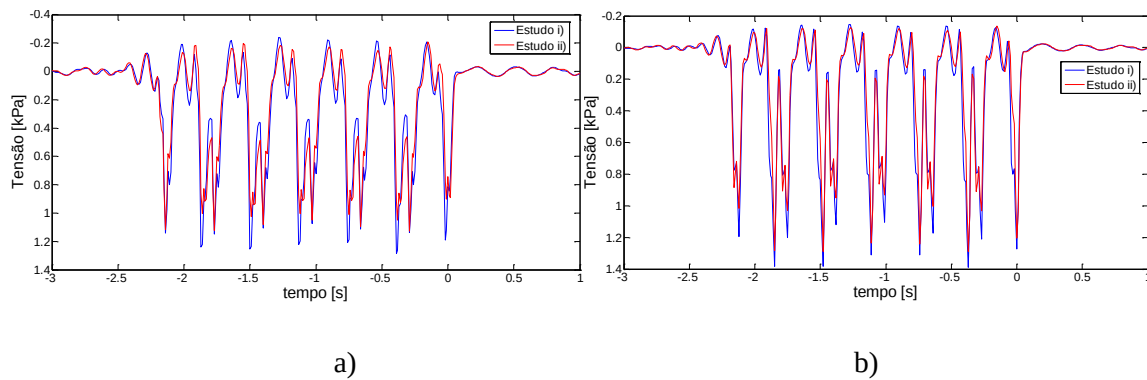


Figura 4.38 – Representação geométrica dos elementos a analisar.

As Figuras 4.39 e 4.40 apresentam os resultados para as várias componentes de tensão, considerando a utilização dos perfis de irregularidades 2 e 3, respetivamente, pretendendo-se avaliar a influência da frequência de excitação no estudo proposto neste ponto. Considerando uma velocidade de circulação do comboio de 70 m/s e os comprimentos de onda indicados no Quadro 4.7 para os perfis em análise, obtêm-se frequências de excitação de valores iguais a 4,7 Hz e 9,3 Hz, respetivamente.

Note-se que o Elemento 1 se encontra sobre o plano de simetria da linha férrea, pelo que as tensões tangenciais τ_{xy} e τ_{yz} são nulas e, por esse motivo, não são apresentadas.



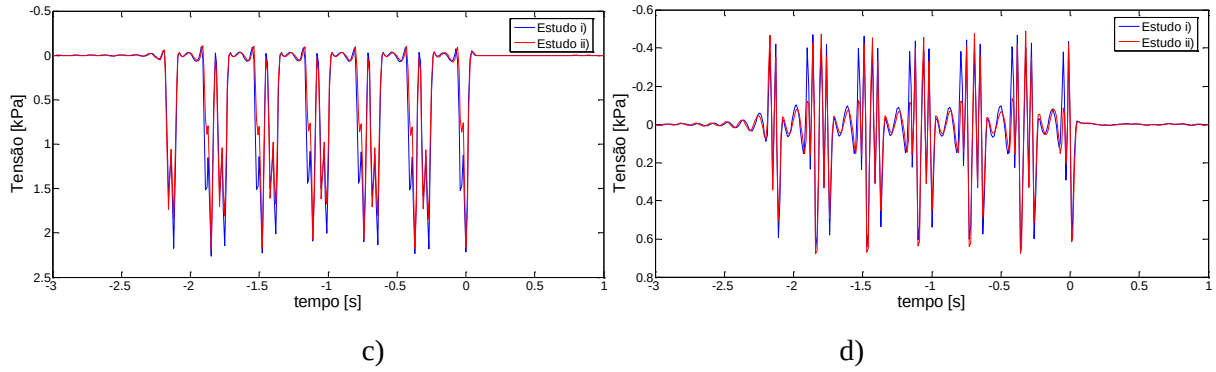


Figura 4.39 – Comparação dos resultados das tensões do Elemento 1 para as duas formas de modelação do veículo consideradas (Frequência de excitação=4.7 Hz): a) Tensão normal σ_x ; b) Tensão normal σ_y ; c) Tensão normal σ_z ; d) Tensão tangencial τ_{xz} .

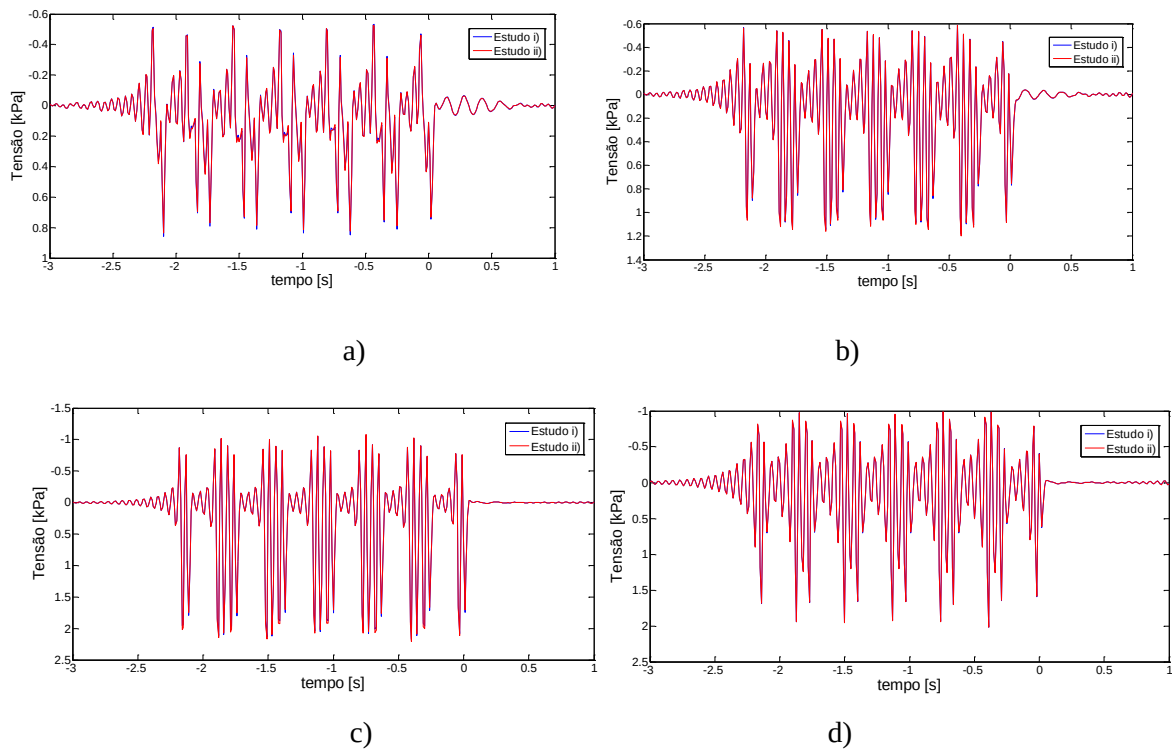


Figura 4.40 – Comparação dos resultados das tensões do Elemento 1 para as duas formas de modelação do veículo consideradas (Frequência de excitação=9.3 Hz): a) Tensão normal σ_x ; b) Tensão normal σ_y ; c) Tensão normal σ_z ; d) Tensão tangencial τ_{xz} .

Como é possível observar, para a frequência mais elevada as diferenças nos resultados para as várias componentes de tensão em ambas as formas de modelação do veículo são mínimas ou mesmo inexistentes. Já considerando os resultados relativos a uma frequência de excitação mais reduzida, a conclusão anterior não se aplica. Estudos complementares, que aqui não são apresentados de modo a não sobrecarregar em demasia a leitura, indicam que estes comportamentos se mantêm quando consideradas frequências de excitação superiores e inferiores às consideradas, respetivamente, com a particularidade de se verificarem maiores discrepâncias entre as duas formas de modelação do veículo para frequências ainda mais reduzidas.

A baixa frequência de ressonância da caixa do veículo sobre a suspensão secundária, situada em valores próximos ou até mesmo inferiores a 1 Hz, é a razão para as conclusões retiradas atrás. Segundo Alves Costa (2011), verifica-se uma perfeita concordância entre os resultados obtidos considerando a modelação do veículo completo ou apenas os bogies e respetivos eixos para frequências superiores a aproximadamente 10 Hz, valores que estão de acordo com os resultados alcançados anteriormente

Face ao exposto, pode-se concluir que para a realização de estudos paramétricos onde se pretenda apenas a avaliação da interação via-veículo para frequências superiores a aproximadamente 10 Hz a modelação da caixa do veículo é uma tarefa dispensável, uma vez que a modelação de apenas os bogies e os respetivos eixos origina uma resposta coincidente com a primeira, conforme verificado.

De acordo com as conclusões alcançadas, os estudos paramétricos que se seguem são efetuados considerando a metodologia de modelação do veículo mais completa, de modo a apresentar-se uma coerência na exposição dos vários estudos, referentes a distintas frequências de excitação da carga.

4.6.3. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO MECANISMO DE EXCITAÇÃO DINÂMICA NAS ALTERAÇÕES DO ESTADO DE TENSÃO

A interação preconizada entre o veículo e a via é também ela responsável pela geração de vibrações que provocam a alteração do estado de tensão. A velocidade de circulação do veículo, a frequência de oscilação da carga e a amplitude das irregularidades da via são fatores que influenciam, em maior ou menor grau, as alterações do estado de tensão. Estas questões serão alvo de um estudo aprofundado que se apresenta seguidamente.

Considerem-se três velocidades de circulação do veículo: i) velocidade baixa, 15 m/s; ii) velocidade média, 30 m/s; iii) velocidade elevada, 70 m/s. A combinação destas três velocidades com os perfis de irregularidades apresentados no Quadro 4.7 permite estudar um vasto leque de hipóteses e a retirada de algumas conclusões.

Numa primeira abordagem, pretende-se a avaliação do grau de influência do mecanismo de excitação dinâmico, comparativamente com uma análise em que apenas é considerado a influência do mecanismo quasi-estático. Neste estudo considere-se a exposição das componentes de tensão σ_z e τ_{xz} , para várias frequências de excitação da carga e uma velocidade de circulação de 70 m/s. Os elementos em estudo são os representados na Figura 4.38, sob o plano de simetria, pelos números 1 e 3.

É conveniente desde já referir que a apresentação dos resultados referentes apenas à tensão normal σ_z se deve à maior facilidade de interpretação dos mesmos, não se perdendo generalidade pois, é possível retirar conclusões semelhantes analisando as restantes tensões normais. Relativamente às tensões tangenciais apenas se apresenta a tensão τ_{xz} uma vez que, como já anteriormente referido, os elementos em análise se encontram sob o plano de simetria.

Repare-se nas Figuras 4.41 e 4.42 que traduzem as alterações das componentes de tensão referidas, admitindo uma velocidade de 70 m/s e o Perfil 1 de irregularidades (frequência de excitação igual a 2.3 Hz), para os Elementos 1 e 3.

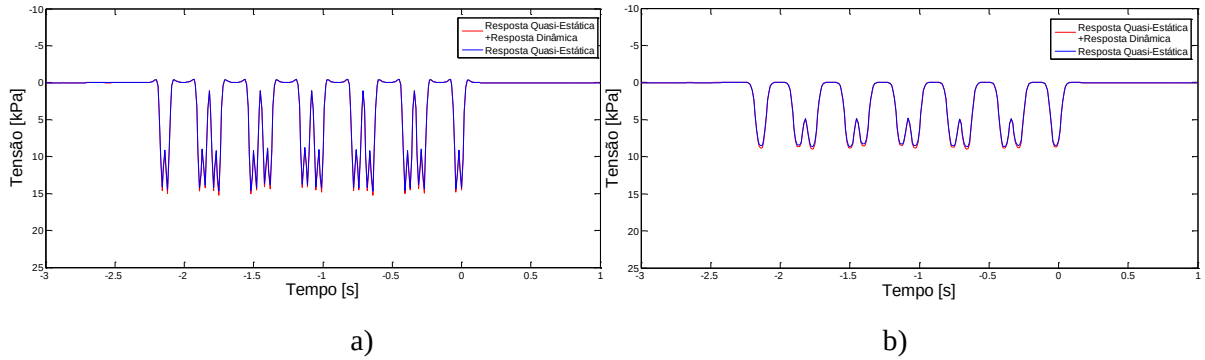


Figura 4.41 – Representação da tensão normal σ_z ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 1 de irregularidades e $V=70$ m/s): a) Elemento 1; b) Elemento 3.

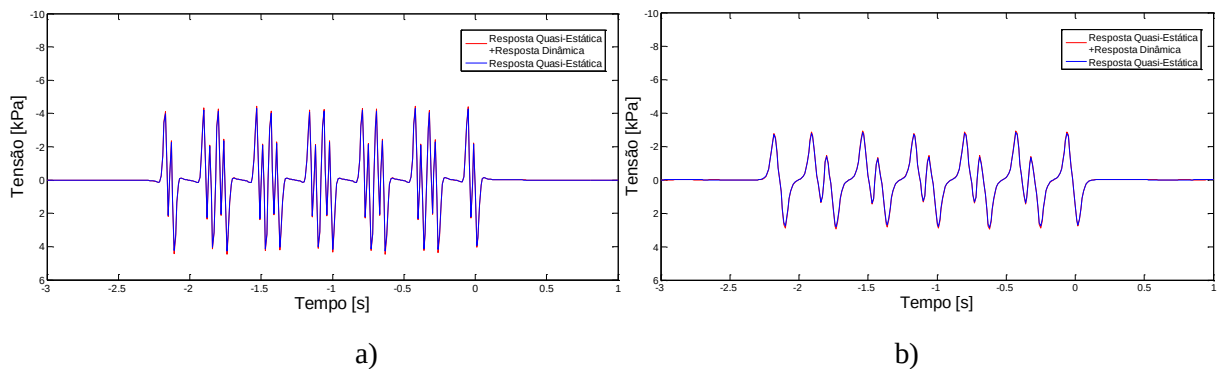


Figura 4.42 – Representação da tensão tangencial τ_{xz} ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 1 de irregularidades e $V=70$ m/s): a) Elemento 1; b) Elemento 3.

Como é possível de observar as duas respostas para as duas componentes de tensão analisadas são praticamente coincidentes, não se verificando grandes incrementos devido à consideração da análise dinâmica. Este resultado está relacionado com o comprimento de onda considerado para a irregularidade, ao qual está associado uma baixa frequência.

No que diz respeito às diferenças verificadas entre os dois elementos em estudo, como seria expectável, ocorre uma acentuada degradação das alterações ao estado de tensão em profundidade, em termos de valores absolutos, deixando de se conseguir distinguir os eixos do comboio, passando apenas a ser possível uma interpretação ao nível dos bogies.

Para frequências de oscilação da carga superiores à considerada anteriormente, a influência da resposta dinâmica começa a ser significativa, conforme se pode observar nas Figuras 4.43, 4.44, 4.45 e 4.46.

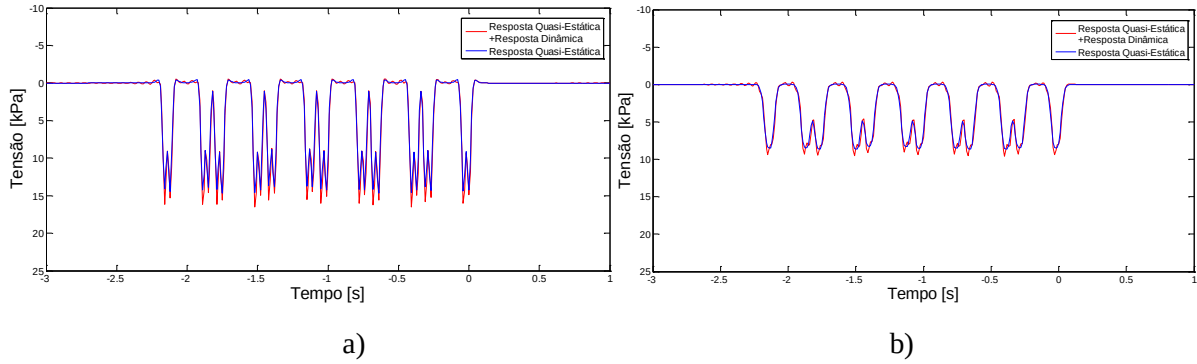


Figura 4.43 – Representação da tensão normal σ_z ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 3 de irregularidades e $V=70\text{m/s}$): a) Elemento 1; b) Elemento 3.

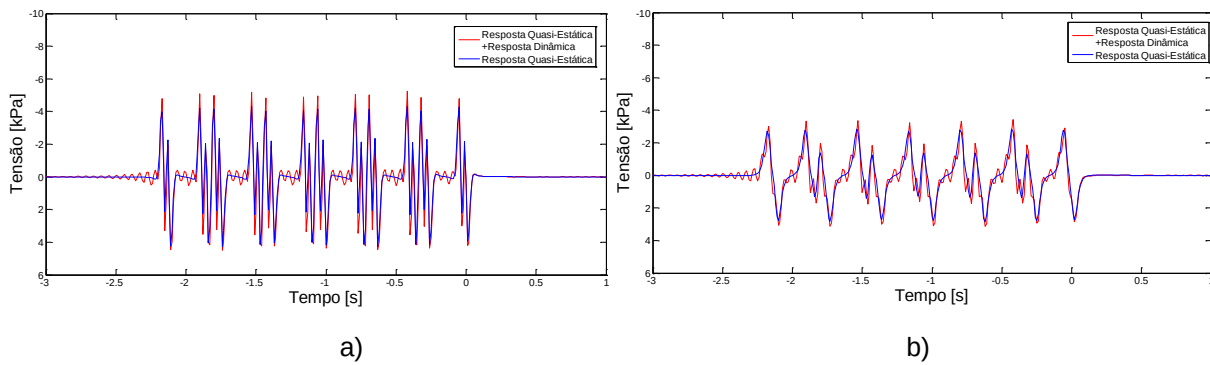


Figura 4.44 – Representação da tensão tangencial τ_{xz} ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 3 de irregularidades e $V=70\text{m/s}$): a) Elemento 1; b) Elemento 3

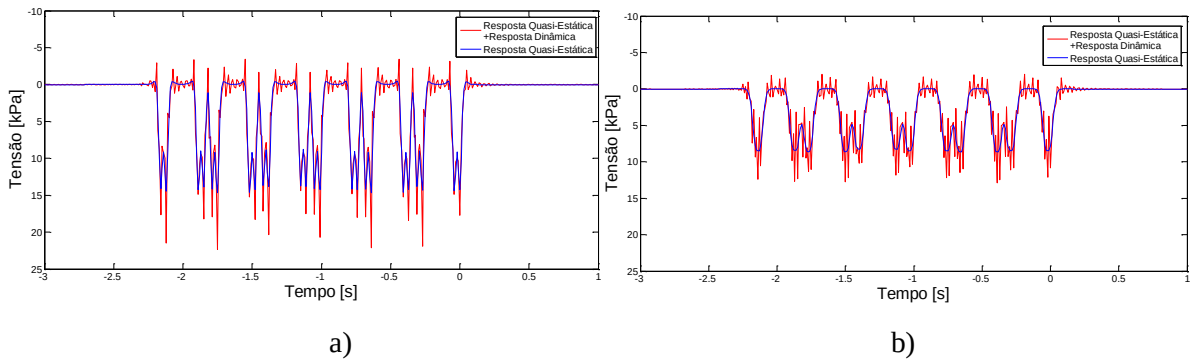


Figura 4.45 – Representação da tensão normal σ_z ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 5 de irregularidades e $V=70\text{m/s}$): a) Elemento 1; b) Elemento 3.

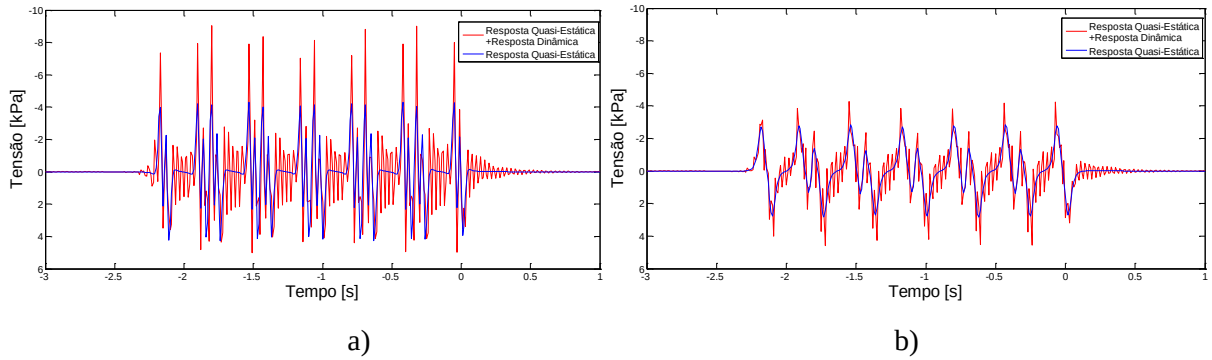


Figura 4.46 – Representação da tensão tangencial τ_{xz} ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 5 de irregularidades e $V=70\text{m/s}$): a) Elemento 1; b) Elemento 3.

A gama de frequências avaliadas nas figuras anteriormente expostas permite a percepção da ocorrência de contínuas oscilações entre os bogies do comboio devido à consideração do mecanismo de excitação dinâmico, apesar de o aspeto típico das componentes de tensão se manterem praticamente inalteradas. Estas oscilações começam a ser notadas momentos antes da passagem do primeiro eixo, propagando-se durante alguns instantes após a passagem do último eixo do comboio (vibração livre). Na tensão tangencial τ_{xz} são ainda perceptíveis as sucessivas alterações de sinal, correspondentes a rotações de 90° das direções de tensão principal. Estas rotações provocam grandes distorções no solo, podendo levar à rotura alguns pontos, se o nível de distorção aumentar de uma forma acentuada.

Comparando a influência do mecanismo de excitação dinâmico para os elementos a diferentes profundidades, para além das diferenças relacionadas com a redução dos valores das tensões, como referido anteriormente, não são perceptíveis grandes contrastes, verificando-se uma relação entre os maiores picos das curvas correspondentes às duas análises aproximadamente constante.

Considerando um comprimento de onda ainda mais reduzido, correspondente ao Perfil 6 de irregularidades apresentado anteriormente (frequência de oscilação igual a 93 Hz), as oscilações assumem uma maior amplitude e verifica-se que os picos de tensão de valor negativo são muito elevados, conforme retratado na Figura 4.47.

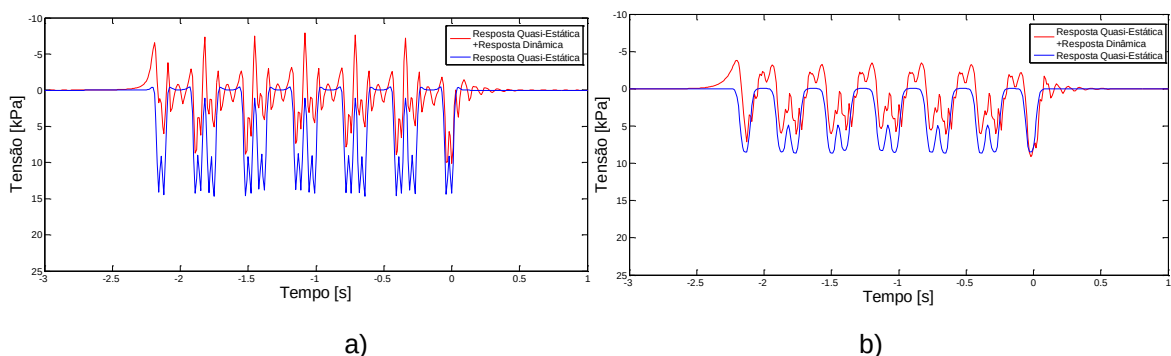


Figura 4.47 – Representação da tensão normal σ_z ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 6 de irregularidades e $V=70\text{m/s}$): a) Elemento 1; b) Elemento 3.

Verifica-se ainda que os incrementos de tensão com a consideração de uma análise quasi-estática são superiores aos obtidos realizando uma análise conjunta entre esta e a análise dinâmica. Este facto resulta de as forças de interação poderem apresentar valor negativo ou positivo, dependendo da posição do veículo ao longo da irregularidade.

Analisando agora os elementos afastados do eixo de simetria, de modo a comparar o peso de cada um dos mecanismos de excitação de uma forma mais abrangente, observem-se os resultados da tensão normal σ_z e da tensão tangencial τ_{xz} para as várias frequências analisados anteriormente, presentes nas Figuras 4.48, 4.49, 4.50, 4.51, 4.52 e 4.53.

Refira-se desde já, que a representação da tensão vertical para o elemento mais à superfície não é a melhor forma de caracterizar o estado de tensão, uma vez que, por condições de equilíbrio, as tensões à superfície são nulas e portanto as tensões médias no elemento não serão muito significativas. No entanto, de modo a manter a coerência com os estudos realizados anteriormente, será apresentada essa mesma componente de tensão nas análises a este elemento.

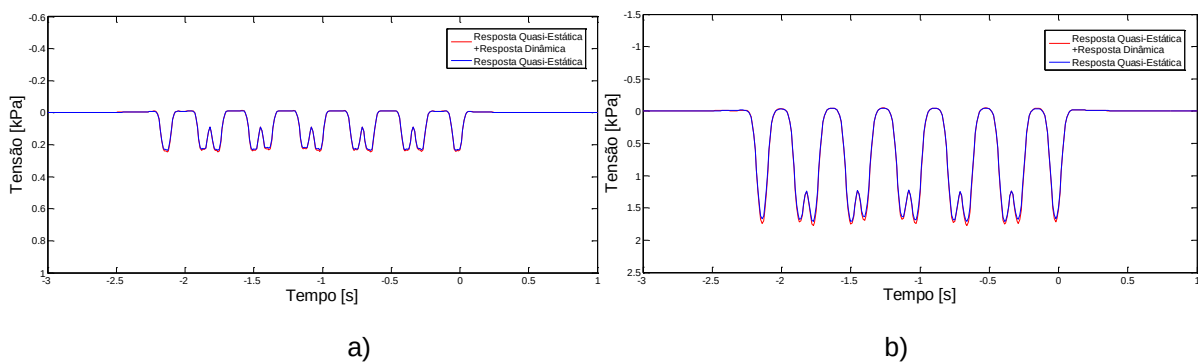


Figura 4.48 – Representação da tensão normal σ_z ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 1 de irregularidades e $V=70\text{m/s}$): a) Elemento 2; b) Elemento 4.

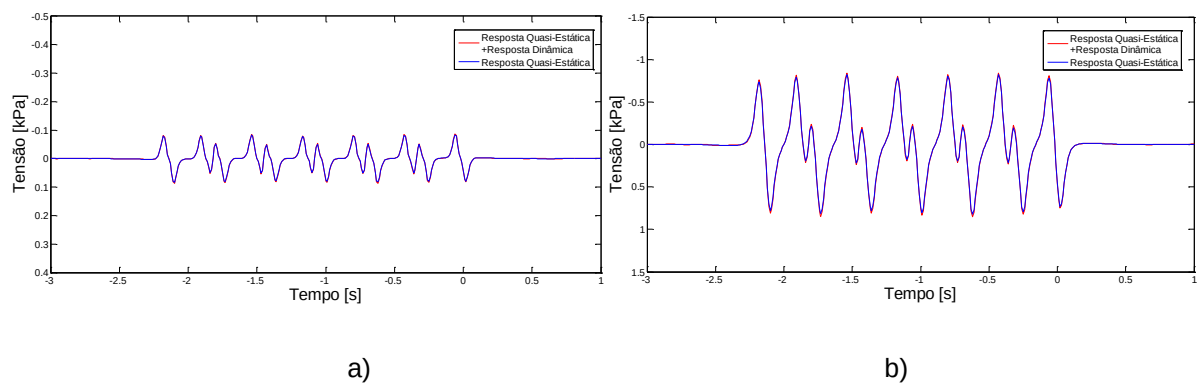


Figura 4.49 – Representação da tensão tangencial τ_{xz} ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 1 de irregularidades e $V=70\text{m/s}$): a) Elemento 2; b) Elemento 4.

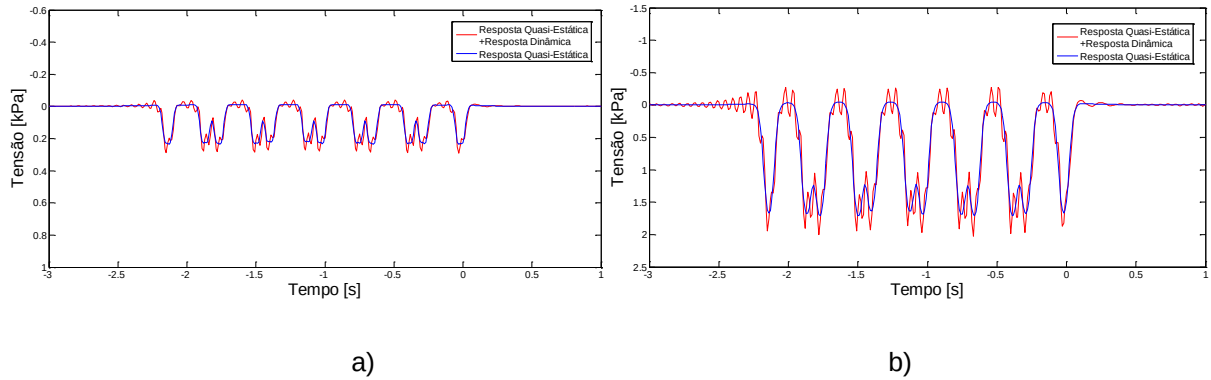


Figura 4.50 – Representação da tensão normal σ_z ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 3 de irregularidades e $V=70\text{m/s}$): a) Elemento 2; b) Elemento 4.

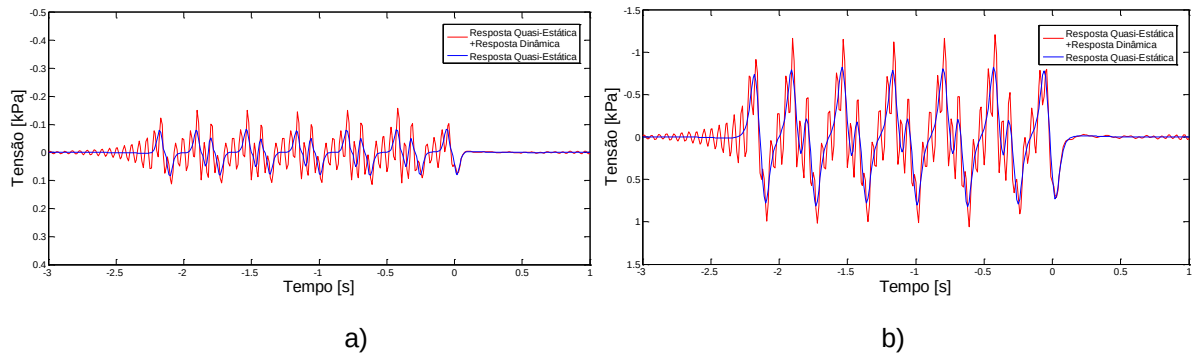


Figura 4.51 – Representação da tensão tangencial τ_{xz} ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 3 de irregularidades e $V=70\text{m/s}$): a) Elemento 2; b) Elemento 4.

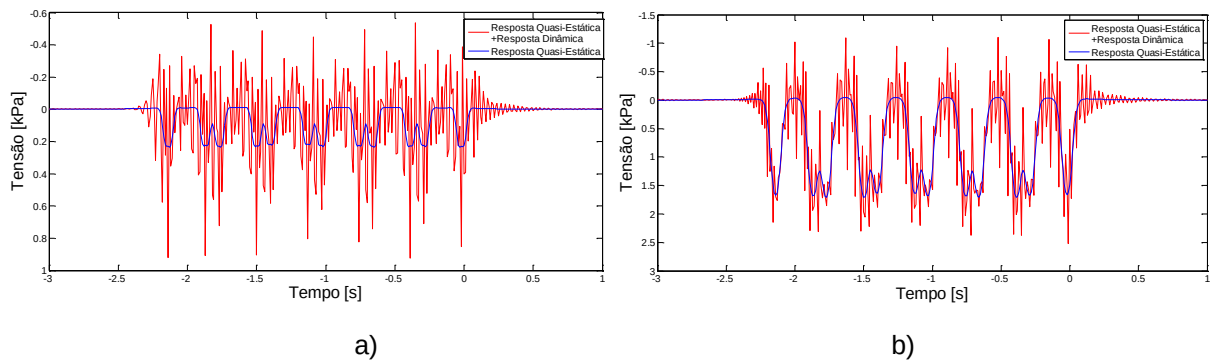


Figura 4.52 – Representação da tensão normal σ_z ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 5 de irregularidades e $V=70\text{m/s}$): a) Elemento 2; b) Elemento 4.

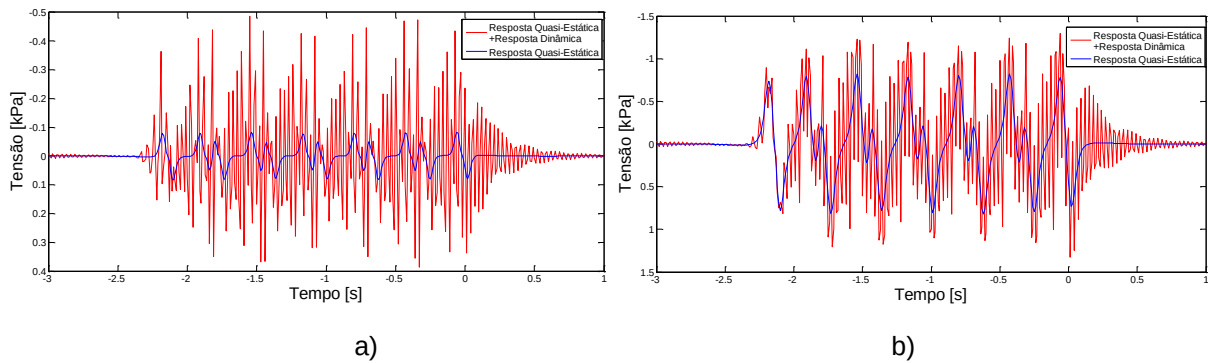


Figura 4.53 – Representação da tensão tangencial τ_{xz} ao longo do tempo, considerando a atuação do mecanismo de excitação quasi-estático e a soma do dinâmico com o quasi-estático (Perfil 5 de irregularidades e $V=70\text{m/s}$):
a) Elemento 2; b) Elemento 4.

Como é possível observar através das figuras anteriores, o grau de influência do mecanismo de excitação dinâmico é mais significativo para os elementos do maciço da fundação que se encontram mais afastados do eixo da via, nos diversos valores de frequência considerados. Para além desta constatação, observa-se uma vez mais nestes elementos que o peso do mecanismo de oscilação dinâmico, nas baixas frequências de oscilação da carga, é muito reduzido quando comparado com o mecanismo quasi-estático.

Chama-se ainda a atenção, para a diferença de escalas entre as componentes de tensão representadas para os dois elementos, uma vez que, como explicado anteriormente, o Elemento 2 por se encontrar próximo da superfície apresenta pequenos incrementos de tensão.

De forma a sintetizar o estudo da interação entre o veículo e a via e as suas repercussões na alteração do estado de tensão do maciço de fundação analisam-se os valores máximos dos incrementos de tensões σ_x , σ_z e τ_{xy} originados pelo mecanismo de excitação dinâmico, para o Elemento 1 (ver Figura 4.38). À semelhança da análise efetuada em Yang *et al* (2009), apresentam-se as Figuras 4.54 e 4.55, onde o eixo das abcissas representa a “frequência de passagem” v/L_i , ou seja, a quantificação do número de ciclos que uma dada roda experimenta durante um segundo (definição de frequência). Na elaboração das figuras referidas admite-se a existência de comprimentos de onda curtos e longos, respetivamente, conforme indicado no Quadro 4.9.

Esta distinção surge de acordo com a proposta de Selig and Waters (1994), que admite a existência de duas categorias de comprimentos de onda para os defeitos do carril, considerando uma velocidade base de 200 km/h (55 m/s): i) inferiores a 2 metros, causados principalmente pela própria forma do carril; ii) superiores a 5 metros, devendo-se sobretudo à forma da camada de balastro. Os vários comprimentos de onda apresentados no Quadro 4.9 foram adaptados a esta proposta, à semelhança do efetuado por Yang *et al* (2009), implicando um ajuste dos mesmos.

Refira-se ainda, que o facto do elemento em estudo se encontrar sobre o plano de simetria significa que a tensão σ_y é sempre uma tensão principal, em virtude das tensões tangenciais τ_{xy} e τ_{yz} serem nulas. Por este motivo o interesse da apresentação desta tensão é reduzido, não sendo representada.

Quadro 4.9 – Divisão em diferentes categorias dos comprimentos de onda e respetivas frequências de oscilação mediante a velocidade.

			Velocidades		
			70	30	15
Frequência [Hz]	Comprimentos de onda curtos [m]	0.75	93.3	40	20
		1.1	63.6	-	-
		1.5	46.7	20	10
	Comprimentos de onda longos [m]	3.75	18.7	8	4
		7.5	9.3	4	2
		15	4.7	2	1
		30	2.3	1	0.5

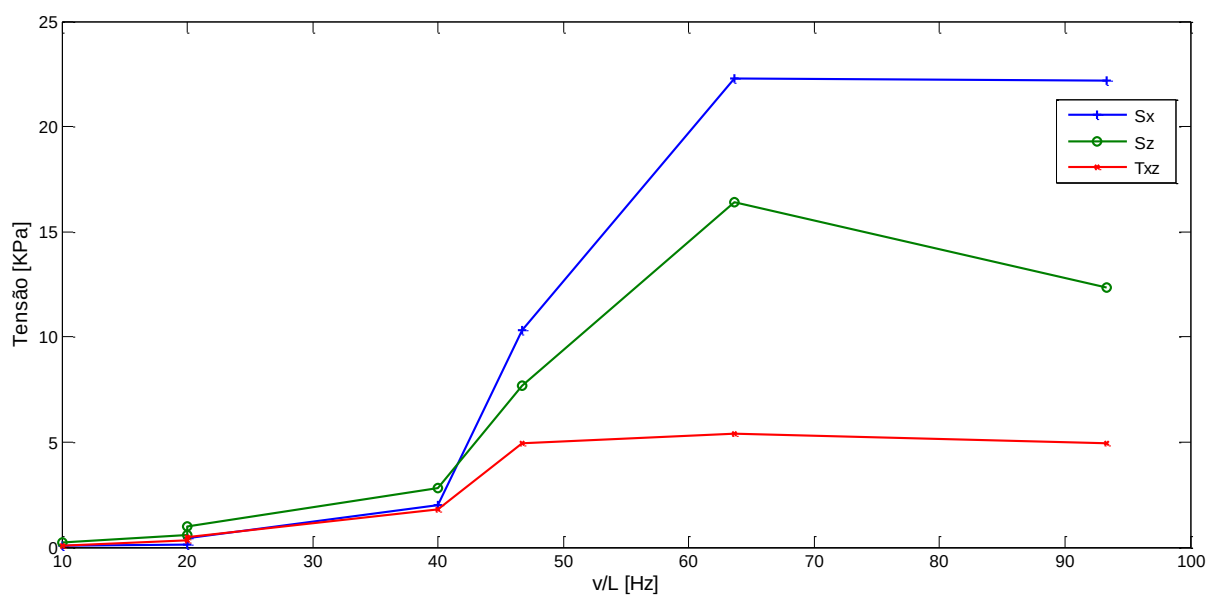


Figura 4.54 – Alterações nas tensões normais resultantes das forças de interação dinâmicas originadas por comprimentos de onda curtos (Elemento 1).

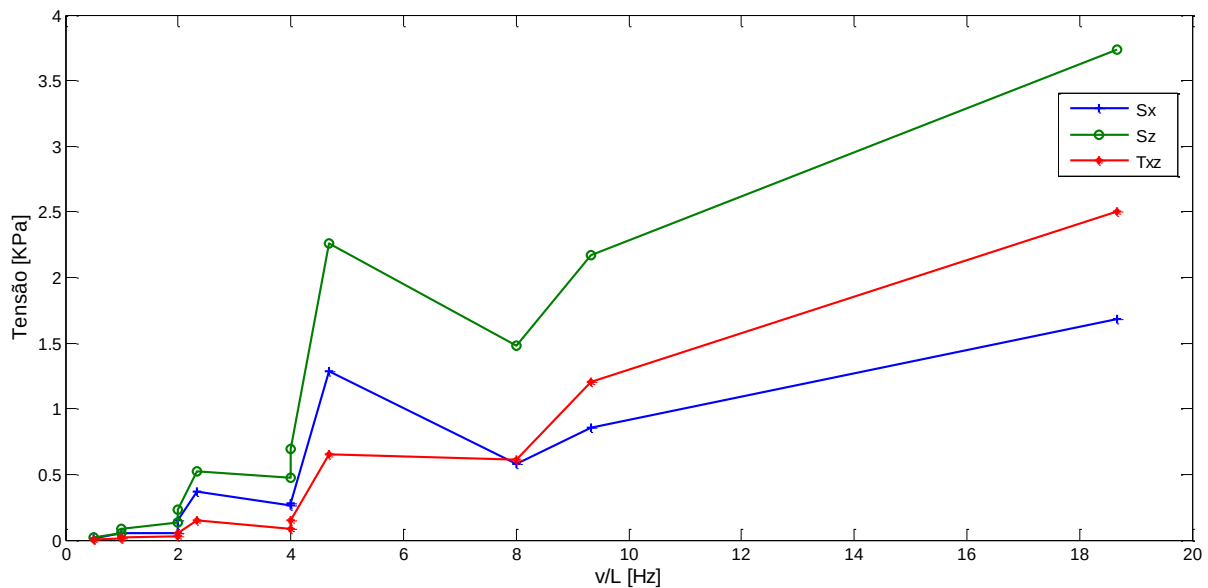


Figura 4.55 – Alterações nas tensões normais resultantes das forças de interação dinâmicas originadas por comprimentos de onda longos (Elemento 1).

A consideração de imperfeições nos carris com comprimentos de onda curtos origina incrementos de tensões no solo que aumentam com a “frequência de passagem” até um máximo que se situa entre 60 – 70 Hz e passa a ter uma trajetória descendente a partir daí, devendo-se este pico à ressonância das massas não suspensas do comboio, tal como constatado em Alves Costa *et al* (2012). De modo a avaliar este pico foi necessário considerar um novo perfil de irregularidades relativamente aos inicialmente apresentados no Quadro 4.7, do qual resulta uma frequência de excitação em torno dos valores referidos, para a velocidade de 70 m/s. Esse mesmo perfil definiu-se com um comprimento de onda de valor igual a 1.1 m e uma amplitude de 0.2 milímetros.

Já considerando comprimentos de onda longos, de uma forma global as várias componentes de tensão aumentam continuamente, embora com pequenas incorreções neste comportamento. É assim, possível identificar duas combinações específicas de velocidades de circulação e comprimentos de onda das irregularidades causadoras de dois tipos de ressonância. Estas conclusões estão de acordo com experiências realizadas por Yang *et al* (2009), tendo-se obtido resultados semelhantes.

É de notar ainda a ordem de grandeza dos incrementos de tensão para baixas frequências de oscilação da carga em comparação com os verificados para altas frequências. De facto, tal como nos estudos no domínio do tempo efetuados anteriormente, observa-se uma grande diminuição destes com a diminuição da frequência.

Na análise à Figura 4.54 verifica-se a ocorrência de um aspeto peculiar. A tensão normal σ_z toma valores inferiores à tensão normal σ_x para elevadas frequências. Este facto tem como base de explicação a posição do comboio sobre a irregularidade, definida através de uma senoide, no instante em que se verificam os valores máximos dos incrementos de tensão. Recorde-se que, nas representações efetuadas no domínio do tempo, se tem vindo a considerar a última roda do veículo posicionada sobre a secção de referência para o instante $t=0$ s. Com a consideração de um novo ponto de observação, obtêm-se configurações das alterações do estado de tensão em que a tensão vertical σ_z é superior à tensão horizontal σ_x , como seria expectável à partida, conforme se pode observar na

Figura 4.56. Assim, demonstra-se que a particularidade da tensão normal σ_x ser superior a σ_z para elevadas frequências está associada à posição do comboio sobre a irregularidade, conforme referido.

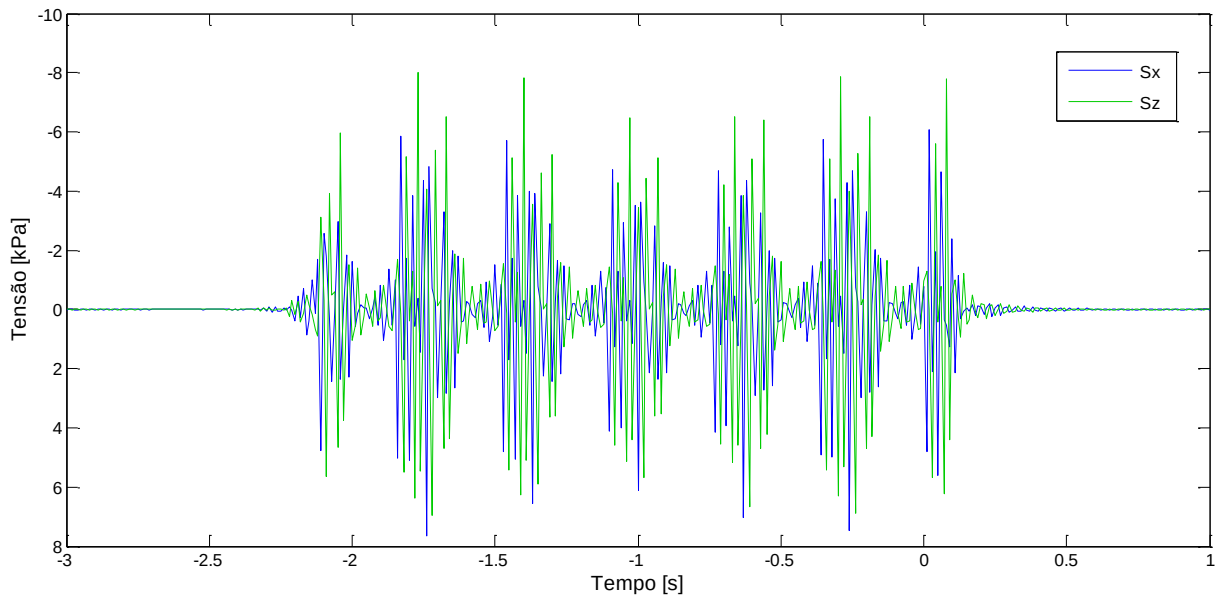


Figura 4.56 – Incrementos de tensão no Elemento 1 devido à consideração do mecanismo de excitação dinâmico (Perfil 5 de irregularidades e $V=70$ m/s)

A análise efetuada anteriormente foi realizada tendo por base a frequência de excitação da carga e, como tal, não se distinguem os valores correspondentes às várias velocidades envolvidas. Assim, o autor propõe apresentar os mesmos resultados procedendo-se a uma análise isolada para cada velocidade, seguindo-se as Figuras 4.57, 4.58 e 4.59 referentes às velocidades de 70 m/s, 30 m/s e 15 m/s, respetivamente.

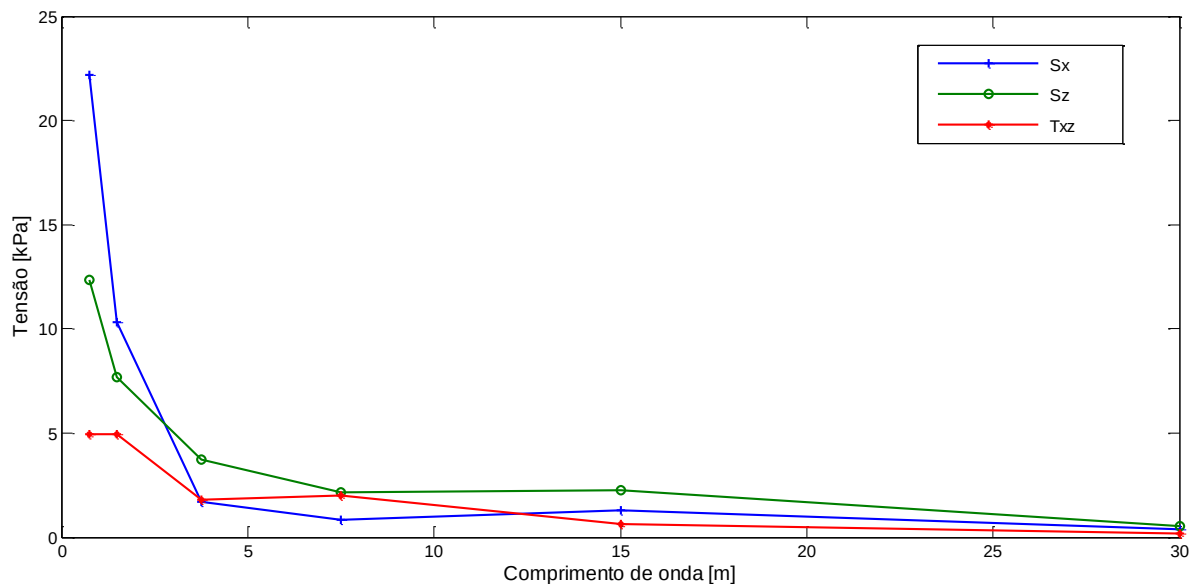


Figura 4.57 – Incrementos de tensão máximos para uma velocidade de 70 m/s (Elemento 1).

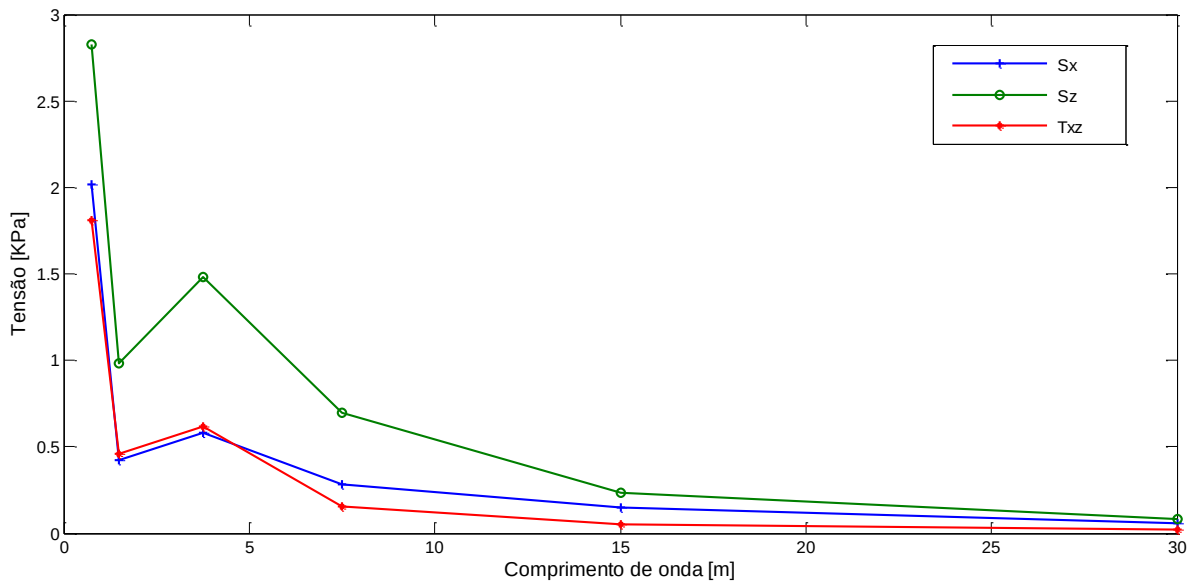


Figura 4.58 – Incrementos de tensão máximos para uma velocidade de 30 m/s (Elemento 1).

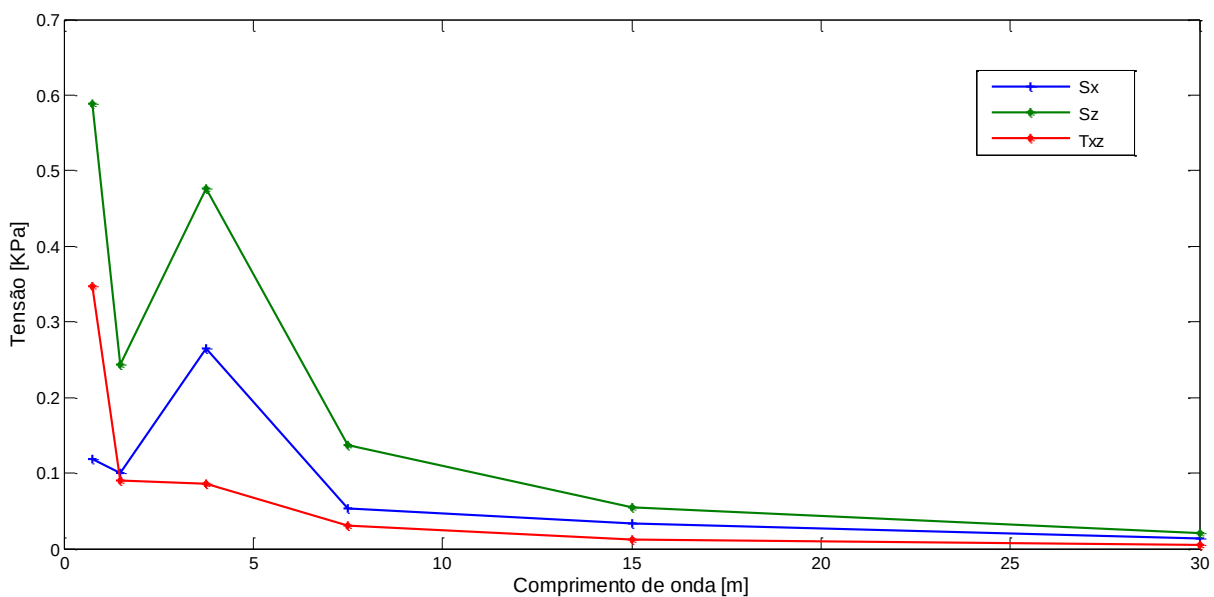


Figura 4.59 – Incrementos de tensão máximos para uma velocidade de 15 m/s (Elemento 1).

A primeira conclusão a retirar da análise às figuras anteriores é a maior amplitude dos incrementos de tensão para comprimentos de onda mais reduzidos, ou seja, na gama de frequências elevadas, verificando-se uma grande diminuição, em valores absolutos, desses incrementos com a redução da velocidade de circulação.

A conclusão retirada na análise anterior, acerca do aumento dos incrementos de tensão até uma gama de frequências entre 60 a 70 Hz e a diminuição a partir dessa gama, é também constatada na Figura 4.57, correspondente a uma velocidade de 70 m/s. De acordo com os comprimentos de onda analisados, apenas para esta velocidade se atinge a gama de frequências em questão. Para as restantes velocidades visualiza-se, de uma forma geral, uma diminuição dos incrementos com o aumento do

comprimento de onda. A exceção verifica-se quando considerado um comprimento de onda na ordem dos 3,75 m, para o qual se regista um contraste no comportamento, devendo-se possivelmente à ressonância dos bogies.

4.6.4. ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE MAJORAÇÃO DAS FORÇAS DE INTERAÇÃO E DAS TENSÕES

No presente ponto, pretende-se inicialmente efetuar uma análise das forças dinâmicas, por eixo do veículo, geradas com a interação dinâmica veículo-via, avaliando a importância destas em comparação com o peso estático do eixo de maior carga do comboio e a sua comparação com valores presentes na bibliografia da especialidade.

Normalmente, o dimensionamento de uma linha férrea não avalia explicitamente o efeito dinâmico resultante da interação comboio-via, isto para velocidades não muito elevadas (inferiores a 200 km/h). A consideração desta parcela dinâmica é efetuada de um modo indireto, através da majoração da carga estática do peso do veículo com um coeficiente K, sendo corrente a consideração de um fator de 1.5 para esta gama de velocidades. Para velocidades mais elevadas é aconselhado efetuar uma análise dinâmica (Fortunato, 2005).

Os Quadros 4.10 e 4.11 apresentam os valores do coeficiente de majoração dinâmica, em função da velocidade de circulação da carga e da frequência de oscilação.

Quadro 4.10 – Avaliação dos coeficientes de majoração para V=70m/s (252km/h).

	Comprimento de onda [m]	Frequência [Hz]	Força de interação máxima entre via e veículo [kN]	Força máxima por eixo [kN]	Coeficiente de Majoração (K)
V=70 m/s	30	2.3	5.85	139.23	1.04
	15	4.7	19.53		1.14
	7.5	9.3	21.83		1.16
	3.75	18.7	34.34		1.25
	1.5	46.7	76.25		1.55
	1.1	63.6	128.35		1.92
	0.75	93.3	58.77		1.42

Quadro 4.11 – Avaliação dos coeficientes de majoração para $V=30\text{m/s}$ (108km/h).

	Comprimento de onda [m]	Frequência [Hz]	Força de interação máxima entre via e veículo [kN]	Força máxima por eixo [kN]	Coeficiente de Majoração (K)
V=30 m/s	30	1.0	2.76	139.23	1.02
	15	2.0	3.55		1.03
	7.5	4.0	7.40		1.05
	3.75	8.0	15.90		1.11
	1.5	20.0	7.98		1.06
	0.75	40.0	21.61		1.16

Analisando os resultados para a velocidade mais reduzida ($V=30\text{ m/s}$) verifica-se que o coeficiente de majoração dinâmico apresenta valores em torno de 1.1. Sendo esta velocidade inferior a 200 km/h, pode-se comparar com o coeficiente apresentado anteriormente (segundo Fortunato, 2005) e concluir que existe uma margem de segurança aceitável conforme o dimensionamento corrente em vias férreas para esta gama de velocidades base.

Para a velocidade de 70 m/s (252 km/h), verifica-se um grande incremento no coeficiente de amplificação com o aumento da frequência de oscilação da carga até frequências entre 60 – 70 Hz, intervalo já discutido anteriormente, e uma redução a partir desses valores. O valor máximo obtido ultrapassa em muito o coeficiente de 1.5, verificando-se a pertinência de efetuar uma análise dinâmica para velocidades superiores a 200 km/h, tal como recomendado por Fortunato (2005).

Além do estudo apresentado anteriormente, o autor propõe a avaliação do coeficiente de majoração das tensões, considerando uma velocidade de circulação elevada (70 m/s) e várias frequências de oscilação da carga, tendo por base de comparação os resultados obtidos considerando uma velocidade de circulação do comboio muito reduzida (10 m/s) e a ausência de irregularidades nos carris.

Neste estudo considera-se a avaliação do referido coeficiente para a tensão normal σ_z , a tensão de desvio (q) e a tensão média (p). Os Quadros 4.12 e 4.13 apresentam a informação necessária à sua avaliação e o respetivo valor, para os Elementos 1 e 3 indicados na Figura 4.38.

Quadro 4.12 – Avaliação dos coeficientes de majoração de tensões (Elemento 1).

	V=10 m/s	V=70 m/s									
		0 Hz		2.3 Hz		9.3 Hz		46.7 Hz		63.6 Hz	
	[kPa]	[kPa]	Coef. de Maj.	[kPa]	Coef. de Maj.	[kPa]	Coef. de Maj.	[kPa]	Coef. de Maj.	[kPa]	Coef. de Maj.
ρ _{máx}	9.39	9.71	1.03	9.92	1.06	10.59	1.13	17.68	1.88	22.37	2.38
q _{máx}	7.51	8.43	1.12	8.65	1.15	9.98	1.33	16.95	2.26	26.55	3.54
σ _{z,máx}	14.01	14.66	1.05	15.27	1.09	16.52	1.18	22.31	1.59	30.42	2.17

Quadro 4.13 – Avaliação dos coeficientes de majoração de tensões (Elemento 3).

	V=10 m/s	V=70 m/s									
		0 Hz		2.3 Hz		9.3 Hz		46.7 Hz		63.6 Hz	
	[kPa]	[kPa]	Coef. de Maj.	[kPa]	Coef. de Maj.	[kPa]	Coef. de Maj.	[kPa]	Coef. de Maj.	[kPa]	Coef. de Maj.
p _{máx}	4.01	4.09	1.02	4.13	1.03	4.25	1.06	6.50	1.62	9.33	2.33
q _{máx}	6.81	7.32	1.07	7.35	1.08	8.39	1.23	10.46	1.54	19.66	2.89
σ _{z,máx}	8.33	8.65	1.04	8.72	1.05	9.56	1.15	12.90	1.55	15.33	1.84

Conforme observado nos quadros anteriores, para a velocidade de análise considerada os coeficientes de majoração nas baixas frequências são pouco significativos, apresentando todavia incrementos expressivos com o aumento da frequência de oscilação, até um máximo situado no intervalo 60-70 Hz, conforme observado em estudos anteriores. De facto, para gamas de frequência elevadas os fatores obtidos são bastante elucidativos dos incrementos de tensão que ocorrem.

Comparando os resultados alcançados para os dois elementos em estudo, verifica-se uma redução dos coeficientes de majoração das tensões analisadas, com o aumento da profundidade do ponto em análise. Esta redução verifica-se devido à degradação de tensões que ocorre em profundidade.

Dos estudos efetuados, compreende-se uma vez mais a pertinência de uma análise considerando a interação do sistema via-veículo, com maior relevância para elevadas velocidades e frequências de oscilação da carga na ordem dos 60 – 70 Hz, nas condições de análise admitidas.

4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo avaliaram-se as alterações do estado de tensão do maciço de fundação induzidas pelo tráfego ferroviário, considerando a influência das duas componentes das ações verticais transmitidas pela roda: i) componente quasi-estática, devido ao peso do veículo; ii) componente dinâmica, devido à interação veículo-via. Contudo, antes de se proceder à realização dos correspondentes estudos paramétricos, foi necessário efetuar a caracterização geomecânica de toda a via-férrea e proceder à respetiva modelação numérica, com todas as vicissitudes que um trabalho deste tipo acarreta.

Na análise à primeira componente indutora de modificações no estado de tensão do solo mencionada atrás, foca-se, em primeira instância, a variabilidade de estudos realizados. Estas amplas análises permitiram descortinar um pouco o comportamento do maciço de fundação em termos das alterações do seu estado de tensão, face às solicitações que lhe são impostas. Assim, e com uma sistematização das alterações verificadas sob a forma de trajetórias de tensão num *diagrama p – q*, foi possível avaliar a variabilidade das mesmas tendo em conta a conjugação da velocidade de circulação da carga e a posição relativa dos pontos do maciço analisados, com os devidos comentários aos resultados obtidos.

Deste estudo, há que salientar o efeito da velocidade nas alterações do estado de tensão para os vários elementos do maciço analisados. De facto, esta variável apresenta uma preponderância nas modificações do estado de tensão sofridas pelo maciço de fundação. Tal como avaliado considerando a movimentação de uma carga elementar sobre os carris, o fator de amplificação dinâmico para a velocidade de 150 m/s atinge um valor elevado (aproximadamente igual a 6), no que diz respeito ao aumento da tensão de desvio. Relativamente à tensão média, este fator é pouco significativo, o que do ponto de vista geotécnico se traduz por uma aproximação da superfície de rotura. Este comportamento é também evidenciado com a simulação da passagem do comboio a diferentes velocidades, notando-se em ambas as situações a superação das linhas de rotura nos elementos mais superficiais e um aumento do nível de complexidade das trajetórias de tensão seguidas, para níveis de velocidade próximos da velocidade crítica. Convém voltar a sublinhar que estas linhas de rotura são meramente indicativas, pois a avaliação das alterações do estado de tensão foram efetuadas de uma forma elástica.

Para além da questão da evolução das trajetórias de tensão para diferentes velocidades, foram analisados alguns cenários de variação da posição relativa dos elementos, verificando-se no geral uma degradação das tensões em profundidade e com o afastamento ao eixo da via. Esta última constatação apresenta a particularidade de, com a consideração de velocidades próximas da crítica, os efeitos de amplificação dinâmica serem muito significativos e consequentemente, verifica-se um comportamento contrastante, conforme se teve a oportunidade de avaliar.

No que diz respeito à consideração da interação do veículo com a estrutura ferroviária procurou-se seguir indicações dadas na bibliografia da especialidade na elaboração dos perfis de irregularidades, indutores do mecanismo de excitação dinâmico, no intuito de ser possível obter referências para os resultados alcançados. A avaliação do grau de influência deste mecanismo, para uma série de frequências de oscilação da carga, comparativamente com o mecanismo de excitação quasi-estático, permitiu analisar as combinações mais gravosas referentes à alteração do estado de tensão no maciço de fundação, identificando-se o intervalo de frequências de oscilação da carga de 60 a 70 Hz como a gama de maior influência. A sistematização destas alterações para as várias frequências e velocidades de circulação facilitou a exposição das mesmas e, por consequente, uma interpretação mais consistente e mais global.

A avaliação dos coeficientes de majoração de tensões e das forças de interação dinâmica permitiu ainda, uma percepção clara da influência do mecanismo de excitação dinâmico na avaliação das alterações ao estado de tensão, notando-se uma clara influência da interação via-veículo quando consideradas frequências de oscilação da carga elevadas.

No geral, este capítulo apresenta uma série de resultados muito interessantes, permitindo uma rápida percepção das tendências verificadas e dos fenómenos causadores das mesmas.

5

SIMULAÇÃO DAS ALTERAÇÕES DO ESTADO DE TENSÃO ATRAVÉS DE UM ENSAIO LABORATORIAL

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os custos associados às operações de manutenção de uma linha férrea são um enorme encargo para as administrações ferroviárias. Um conhecimento adequado, em fase de projeto, das melhores opções construtivas a aplicar a estas estruturas, em função da velocidade base de projeto e das condições geomecânicas do maciço, permitiria obter um melhor desempenho face às solicitações impostas e, por consequente, uma grande economia de custos.

Os estudos paramétricos realizados, traduzidos sob a forma de trajetórias de tensão e referentes a diversos elementos do solo, permitiram escrutinar o comportamento do maciço de fundação das estruturas ferroviárias. Estas trajetórias, obtidas em regime elástico, podem ser encaradas como indicativas para a análise experimental da resposta do solo face a ações cíclicas. Assim, a possibilidade de realização de um ensaio de laboratório com a simulação destas mesmas trajetórias é um passo fulcral na avaliação e quantificação da acumulação de dano provocado pelo tráfego ferroviário, e posterior melhoria da estrutura em função das conclusões obtidas.

A grande dificuldade que se coloca nos ensaios laboratoriais correntes para a avaliação das deformações permanentes, como o ensaio triaxial, diz respeito à forma de simulação da rotação da direção de tensões principais que ocorre. Estas mudanças na direção das tensões principais de um dado elemento do solo dependem da profundidade e posição desse elemento, do estado de tensão inicial e até do grau de anisotropia, e levam em conta a magnitude e o número de ciclos de carga-descarga provocados pela circulação dos veículos (Powrie *et al*, 2007). Esta mesma rotação provoca um agravamento das deformações permanentes em comparação com uma análise que não entre em conta com esta especificidade, conforme diversos estudos já realizados (Youd, 1972; Chan & Brown, 1994; Gräbe & Clayton, 2009).

O presente capítulo pretende aliar o conhecimento adquirido com a análise numérica efetuada, mais especificamente na abordagem das trajetórias de tensão induzidas no solo devidas à circulação ferroviária, apresentando as hipóteses de partida e os resultados a obter com a realização de um ensaio laboratorial, com determinadas especificidades que permitam a simulação do problema que se tem vindo a estudar. Espera-se assim, o aprofundamento do conhecimento das leis de acumulação de dano e a melhor forma de lidar com estas deformações.

5.2. APRESENTAÇÃO DOS ENSAIOS LABORATORIAIS CORRENTES

Para uma escolha sustentada do ensaio laboratorial que melhor se adequa à simulação das complexas trajetórias de tensão que se verificam devido ao tráfego ferroviário é conveniente uma breve referência aos ensaios laboratoriais correntes. Assim, é possível averiguar as particularidades de cada um e avaliar qual o mais indicado para a abordagem à problemática em questão.

O Quadro 5.1 apresenta um resumo dos ensaios de laboratório correntemente utilizados, com as principais características de cada um e as condições impostas aquando da sua realização.

Quadro 5.1 – Resumo dos métodos laboratoriais de avaliação de trajetórias de tensão (Adaptado de Sayão, 1989)

Ensaio		Tensões principais controladas	Condições impostas
Direções de Tensão Principais Fixas	Triaxial	σ_1	$\sigma_1=\sigma_3$ & $\alpha=0^\circ$ (compressão) $\sigma_1=\sigma_3$ & $\alpha=90^\circ$ (extensão)
		σ_3	
	Triaxial Deformação Plana	σ_1	$\varepsilon_2=0$; $\alpha=0^\circ$ (compressão) ou $\alpha=90^\circ$ (extensão)
		σ_3	
	Triaxial Verdadeiro	σ_1	$\alpha=0^\circ$ ou 90° ; controlo das tensões principais ou extensões
		σ_2	
		σ_3	
	Triaxial com Cilindro Vazado	σ_1	$\alpha=0^\circ$ ou 90° ; $P_e \neq P_i$; $T=0$; tensões controladas
		σ_2	
		σ_3	
Direções de Tensão Principais com Possibilidade de Rotação	Triaxial Torsional	σ_1	$T \neq 0$; $\sin^2(\alpha)=b$
		σ_2	
		σ_3	
	Corte Simples	-	K_0 - Consolidação; $\varepsilon_2=\varepsilon_y=0$; $\varepsilon_x=0$
	Corte Direcional	σ_1	$\varepsilon_2=0$; Tensões controladas
		σ_3	
		α	
	Torsional com Cilindro Vazado	σ_1	$P_e \neq P_i$; $T \neq 0$; Tensões controladas
		σ_2	
		σ_3	
		α	

Os ensaios que apresentam previamente definidas as direções das tensões principais ostentam logo uma limitação face ao tipo de ensaio que se procura, uma vez que, o objetivo a atingir no ensaio laboratorial é reproduzir as trajetórias de tensão induzidas por tráfego, o que implica a rotação das direções principais. No entanto, convém não deixar de referir o ensaio triaxial, pois este é provavelmente o ensaio mais utilizado nos mais diversos estudos geotécnicos para avaliação do comportamento mecânico dos solos. Apesar desta aparente universalidade de aplicação, o ensaio apresenta limitações pois as direções principais de tensão são fixas. Só é possível o controlo da tensão vertical (σ_z) e da tensão radial ($\sigma_r=\sigma_x=\sigma_y$), correspondentes às direções principais impostas, sendo estas sempre tensões principais, isto é, as tensões tangenciais são nulas nestas direções.

Antes de se efetuarem os comentários acerca dos ensaios que permitem de algum modo a rotação das direções principais de tensão, observe-se a Figura 5.1. Nesta, encontram-se representados, de uma

forma esquemática, os ensaios laboratoriais invocados no Quadro 5.1, fornecendo uma maior sensibilidade sobre o tipo de ensaio a que este se refere.

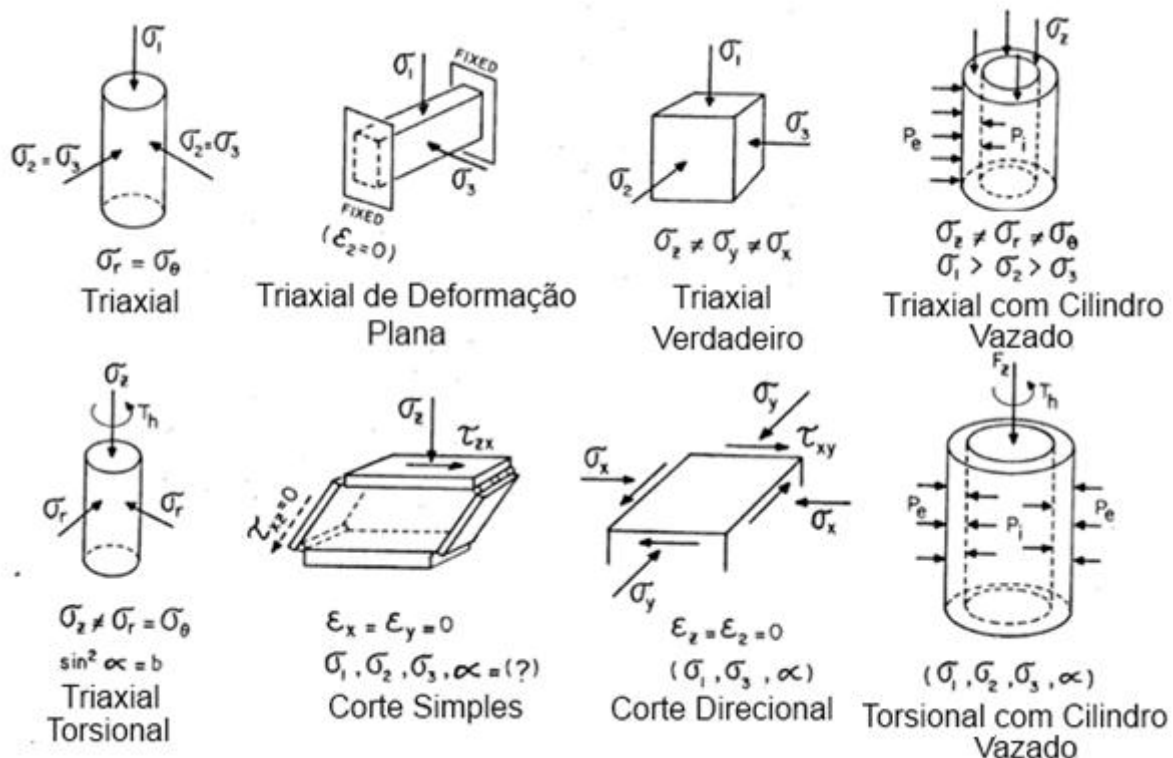


Figura 5.1 – Representação esquemática de exemplos de ensaios laboratoriais (Adaptado de Sayão, 1989)

Relativamente aos ensaios onde é possível algum controlo sobre a orientação da direção das tensões principais, destacam-se os seguintes: i) ensaio triaxial torsional; ii) ensaio de corte simples; iii) ensaio de corte direcional; iv) ensaio de cilindro vazado/oco torsional.

Dentro dos quatro ensaios referidos, o de corte simples e o torsional com cilindro vazado (HCT) são os que aparentam uma melhor adequação ao problema em estudo, uma vez que é possível um controlo na direção e nas três tensões principais. No entanto, o ensaio de corte simples apresenta a limitação de ϵ_x e ϵ_y serem nulos, ou seja, confere ao problema um estado plano de deformação. Assim, atribui-se uma maior relevância ao ensaio torsional de cilindro vazado por ser o menos limitativo na análise da problemática em questão, procurando-se confirmar a aparente aptidão deste ensaio na simulação das trajetórias de tensão induzidas por tráfego ferroviário, par uma posterior avaliação da acumulação de dano originada por um carregamento cíclico.

5.3. ENSAIO TORSIONAL COM CILINDRO VAZADO

5.3.1. APRESENTAÇÃO GERAL DO ENSAIO

O cilindro vazado torsional é um aparelho versátil na avaliação do comportamento mecânico dos solos sob os mais diversos tipos de carregamento. A estrutura do ensaio assemelha-se a um ensaio triaxial, afastando-se deste no que se refere à amostra a ensaiar (ver Figura 5.2). Esta é um cilindro vazado,

permitindo a aplicação de uma pressão interior e de um momento torsor, além da aplicação da pressão externa e carga vertical. Todas estas variáveis podem ser controladas de forma independente, através das várias ligações do aparelho ao exterior, conforme a representação esquemática de todo o equipamento apresentada na Figura 5.3, permitindo o controlo independente das três tensões principais e do ângulo de inclinação de orientação entre as tensões máxima e mínima.

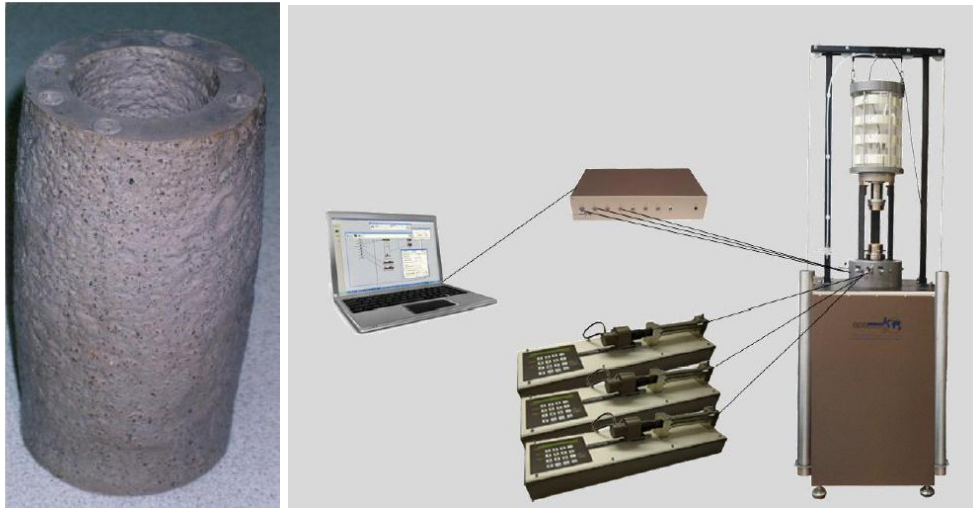


Figura 5.2 – Amostra utilizada no ensaio de cilindro vazado torsional e respetivo aparelho de ensaio (GSD Instruments, 2009)

O teste do cilindro vazado torsional é muito atraente devido à grande variedade de trajetórias de tensão que se podem reproduzir. Neste ensaio é frequente a realização de estudos de avaliação das seguintes variáveis (GDS Instruments, 2009):

- A anisotropia em amostras de solo;
- Os efeitos da rotação da direção das tensões principais;
- Os efeitos da tensão principal intermédia.

Para uma descrição mais pormenorizada do ensaio, segue-se a apresentação do ensaio de cilindro vazado torsional desenvolvido na Universidade de Southampton (Reino Unido) em colaboração com a GSD Instruments Ltd. A Figura 5.3 apresenta o esquema geral do referido aparelho.

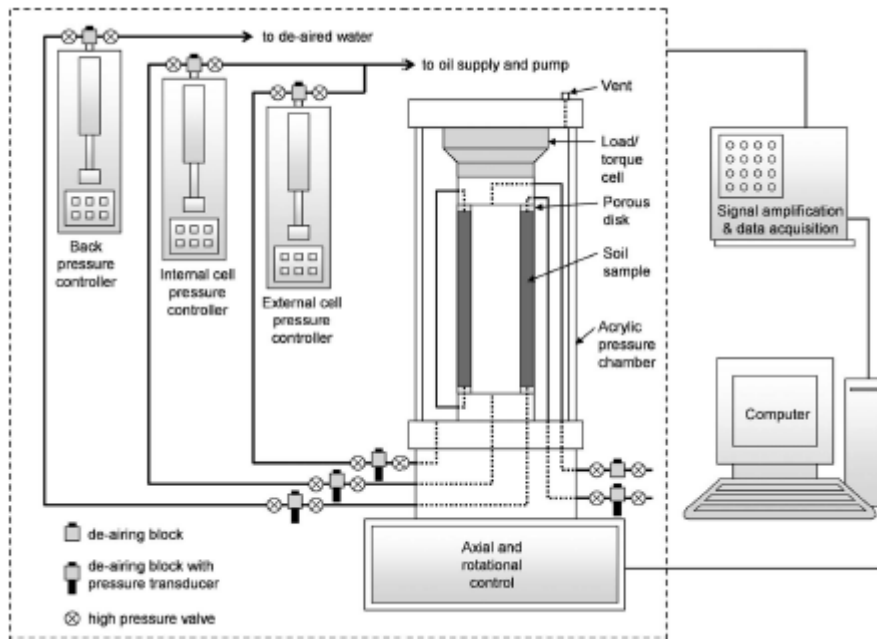


Figura 5.3 – Diagrama esquemático do aparelho de ensaio (Gräbe & Clayton, 2009)

Conforme já referido, este aparelho possui dois servomotores, um para o controlo do movimento axial e um outro para o movimento torsional. Na base da célula existe um controlador que permite impor a torção e a força axial, através da rotação e da translação, respetivamente, responsáveis pelas trajetórias de tensão seguidas. As ligações ao exterior, que se podem observar do lado esquerdo da figura, sugerem o controlo das pressões internas e externas, bem como a contra pressão aplicada nas paredes de topo e base da amostra. Existem ainda duas conexões para a aquisição, registo e controlo de dados através de um sistema informático periférico, permitindo através de um ciclo fechado o controlo da força axial e translação, torção e rotação angular. Relativamente às amostras utilizadas, em particular no aparelho que serve como referência para esta exposição, apresentam diâmetros exterior e interior de 100 mm e 60 mm, respetivamente. A altura da amostra é de 200 mm (Gräbe & Clayton, 2009).

5.3.2. PARÂMETROS DE CONTROLO DE TENSÕES, EXTENSÕES E DISTORÇÕES

A tensão vertical média σ_z , a tensão radial média σ_r , a tensão média no arco σ_θ e a tensão tangencial $\tau_{z\theta}$ exibidas na Figura 5.4 são calculadas através da consideração de equilíbrio de forças, resultando nas equações que se apresentam a seguir, conforme Powrie *et al* (2007).

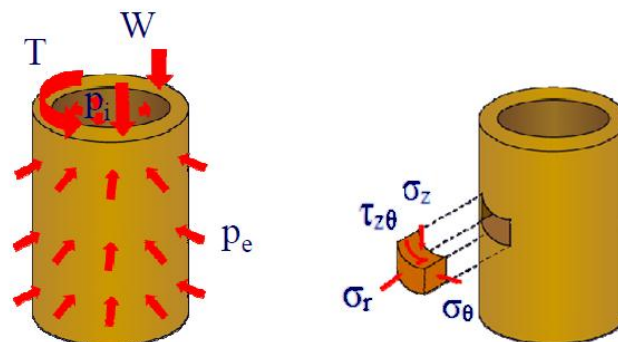


Figura 5.4 – Esquema do carregamento aplicado e tensões originadas num elemento infinitesimal da amostra.

No ensaio HCT a tensão média σ_z é controlada através da aplicação da carga vertical (W) e das pressões interna e externa (p_i e p_e , respetivamente). A sua definição é com base na Equação (5.2).

$$\sigma_z = \frac{W}{\pi(r_e^2 - r_i^2)} + \frac{p_e \cdot r_e^2 - p_i \cdot r_i^2}{r_e^2 - r_i^2} \quad (5.2)$$

Já a tensão tangencial τ_{zx} ($\tau_{z\theta}$), aplicada no plano horizontal, pode ser controlada com base na seguinte relação, expressa na Equação (5.3). O momento torsor (T), como não poderia deixar de ser, é o único responsável pela sua variação.

$$\tau_{zx} = \frac{3T}{2\pi(r_e^3 - r_i^3)} \quad (5.3)$$

Relativamente à tensão radial, σ_y (σ_r), e a tensão no arco, σ_x (σ_θ), são controladas por meio das pressões internas (p_i) e externas (p_e) aplicadas. As Equações (5.4) e (5.5) apresentam a relação existente para as duas tensões normais referidas, respetivamente.

$$\sigma_y = \frac{r_e \cdot p_e + r_i \cdot p_i}{r_e + r_i} \quad (5.4)$$

$$\sigma_x = \frac{r_e \cdot p_e - r_i \cdot p_i}{r_e - r_i} \quad (5.5)$$

Nas equações apresentadas anteriormente, r_e é o valor do raio externo da amostra e r_i do raio interno.

Conforme verificado, é possível controlar as tensões normais, embora as componentes tangenciais τ_{xy} e τ_{yz} sejam sempre nulas. Para além desta potencialidade, é ainda possível avaliar as extensões e a distorção no *plano xz* para um dado carregamento. As equações que se seguem traduzem o cálculo destas variáveis, conforme Sivathayalan *et al* (2011).

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta H}{H} \quad (5.6)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta r_e - \Delta r_i}{r_e - r_i} \quad (5.7)$$

$$\varepsilon_x = -\frac{\Delta r_e + \Delta r_i}{r_e + r_i} \quad (5.8)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{2\Delta x (r_e^3 - r_i^3)}{3H(r_e^2 - r_i^2)} \quad (5.9)$$

onde H se refere à altura da amostra e o símbolo Δ indica a variação de uma dada medida em relação ao seu valor inicial.

Conforme apresentado, a principal limitação deste ensaio diz respeito à não existência de tensões tangenciais nos *planos* *xy* e *yz*, o que confere ao ensaio apenas a possibilidade de simular as trajetórias de tensão em pontos sob o eixo de simetria da via, conforme verificado ao longo dos estudos paramétricos efetuados. Apesar desta limitação, do ponto de vista funcional, as potencialidades deste ensaio são assinaláveis na simulação dos fenómenos de rotação da direção das tensões principais devido à passagem de tráfego ferroviário, para pontos do terreno na referida disposição geométrica.

Relativamente à gama das cargas e tensões possíveis de ser aplicadas na realização do ensaio, há que ter presente as propriedades do equipamento. A partir deste conhecimento é possível elaborar o conjunto de escalões de carga a aplicar, que permitam traduzir as alterações ao estado de tensão. Com este intuito apresenta-se o Quadro 5.2, onde se podem observar os valores máximos destas variáveis e os correspondentes graus de precisão e resolução, conforme Gräbe & Clayton (2009).

Quadro 5.2 – Especificações do equipamento de ensaio no que diz respeito à gama de valores permitida.

Carga/Pressão	Máximo	Resolução	Precisão
Pressão externa	1000 kPa	1 kPa	0.5 kPa
Pressão interna	1000 kPa	1 kPa	0.5 kPa
Momento torsor	0.03 kNm	0.0001 kNm	0.00007 kNm
Esforço axial	10 kN	0.001 kN	0.001 kN

Chama-se a atenção que estas indicações são referentes ao equipamento desenvolvido na Universidade de Southampton (Reino Unido) em colaboração com a GSD Instruments Ltd, o qual tem servido de suporte na apresentação do ensaio. Assim, está salvaguardada a possibilidade de existência de outros equipamentos similares a este, mas com especificidades diferentes, no que a estes valores diz respeito.

5.3.3. SIMULAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DE TENSÃO INDUZIDAS PELO TRÁFEGO FERROVIÁRIO

Com a apresentação e descrição geral do ensaio é já possível a perceção das potencialidades e principais limitações do ensaio. Assim, e recorrendo às expressões enunciadas no ponto anterior da presente dissertação, pretende-se averiguar a exequibilidade da simulação das trajetórias de tensão obtidas numericamente através do ensaio. Este estudo é realizado considerando a simulação de uma carga elementar de valor igual a 130 kN, deslocando-se sobre os carris, conforme representado na Figura 5.5. Considere-se ainda, a análise referente ao Elemento 1 (ver Figura 4.38), situado sob o plano de simetria.

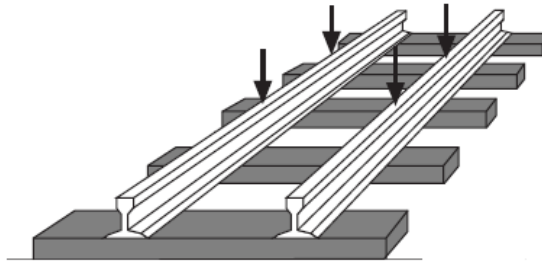


Figura 5.5 – Representação da carga elementar a deslocar-se sobre os carris.

Se for possível alcançar o objetivo enumerado acima, isto é, o ensaio traduzir de uma forma satisfatória as alterações ao estado de tensão provocadas pela circulação da carga, poder-se-á em estudos laboratoriais posteriores averiguar a existência de leis de acumulação de dano, uma vez que o cálculo numérico foi efetuado em regime elástico e, como tal, as deformações permanentes não podem ser avaliadas.

De modo a simular os incrementos de tensão provocados pela passagem da carga, observem-se primeiramente as alterações obtidas com a simulação numérica, conforme a Figura 5.6. Nesta mesma figura, é possível observar a evolução das tensões normais σ_x , σ_y e σ_z e a tensão tangencial τ_{xz} .

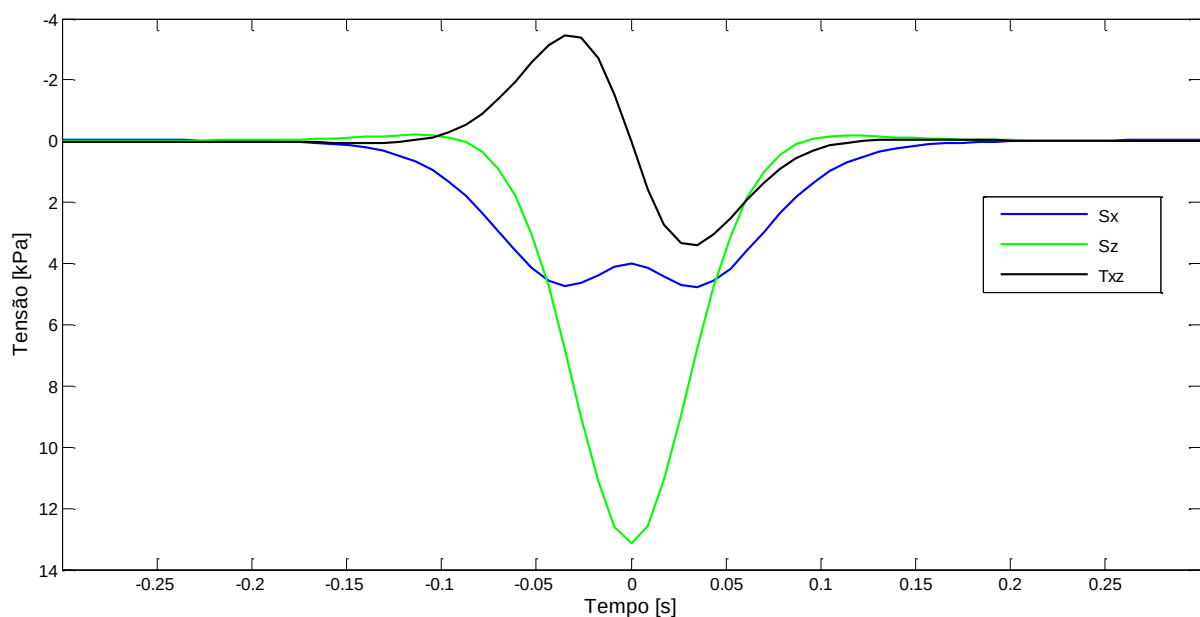


Figura 5.6 – Evolução do estado de tensão com a simulação da passagem de uma carga elementar de valor 130 kN (Elemento 1 e $V=30\text{m/s}$).

O passo seguinte passa pela simulação destas mesmas alterações através da manipulação das cargas e tensões aplicadas no decorrer do ensaio. Assim, e recorrendo às expressões (5.2), (5.3), (5.4) e (5.5), é possível obter a configuração das curvas representativas dos incrementos de tensão, expostas na Figura 5.7.

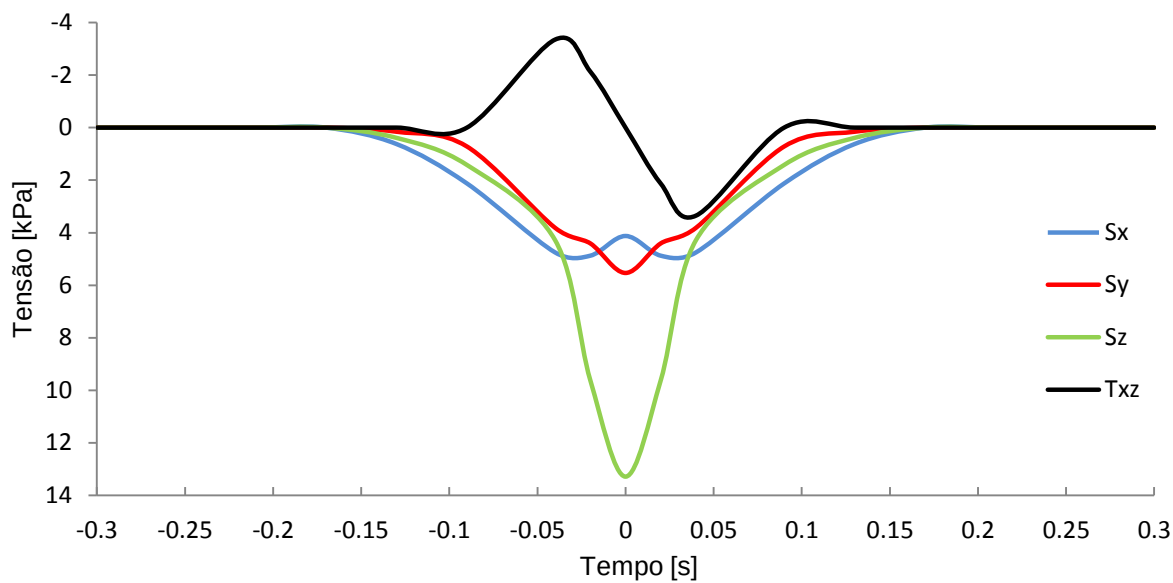


Figura 5.7 – Evolução do estado de tensão através da simulação da realização do ensaio torsional com cilindro vazado.

Os escalões de carga admitidos para a obtenção destas curvas podem ser consultados no Quadro 5.3. Refere-se desde já que os valores de incrementos de tensão e de força aplicados na simulação do ensaio procuram atender à gama de valores máximos e de resolução do equipamento. No entanto, não foi possível cumprir a resolução do aparelho relativamente às pressões interna e externa, de modo a alcançar uma simulação mais próxima da obtida numericamente.

Quadro 5.3 – Escalões de carga admitidos para a simulação das alterações ao estado de tensão.

Pressão externa [kPa]	0	0.25	1	4	4.5	5.25	4.5	4	1	0.25	0
Pressão interna [kPa]	0	0	0.25	3.5	4.25	6	4.25	3.5	0.25	0	0
Momento torsor [kN.m]	0	0	0	-0.0055	-0.0035	0	0.0035	0.0055	0	0	0
Esforço axial [kN]	0	0	0	0	0.1	0.17	0.1	0	0	0	0
Tempo [s]	-0.17	-0.13	-0.09	-0.04	-0.02	0	0.02	0.04	0.09	0.13	0.17

Analisando a Figura 5.8, que representa a comparação dos resultados obtidos, verifica-se uma assinalável semelhança quer na forma, quer no conteúdo das curvas representativas das várias componentes de tensão. De facto, com esta simples simulação analítica os resultados obtidos estão dentro das expectativas criadas, ou seja, há uma semelhança aceitável entre as duas análises.

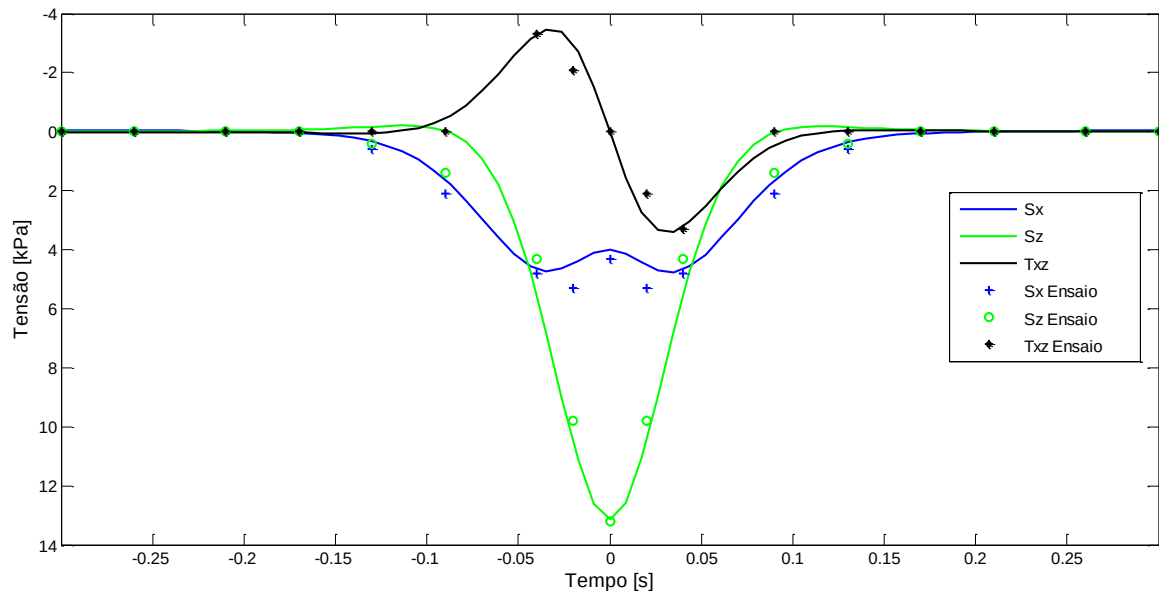


Figura 5.8 – Comparação dos resultados obtidos numericamente com os obtidos através da simulação do ensaio.

Sem embargo do anteriormente referido, observa-se uma maior discrepância no ajuste dos valores da tensão normal σ_y nos instantes próximos a $t=0$ s. No entanto, uma vez que o elemento do solo em estudo se situa sob o plano de simetria, a tensão normal σ_y é sempre uma tensão principal, motivo pelo qual o interesse da sua avaliação não é tão significativo quanto o das restantes tensões apresentadas.

Recorda-se que esta análise apenas tinha como objetivo avaliar a possibilidade do ensaio laboratorial simular as alterações ao estado de tensão, tendo-se verificado, na opinião do autor, essa possibilidade. Ressalva-se a particularidade do não cumprimento da resolução do aparelho no que toca às pressões a aplicar, conforme já referido. No entanto, esta mesma resolução está dependente das especificações próprias do equipamento analisado, existindo outros que se adaptam melhor a esta característica (Sivathayalan *et al*, 2011).

Por fim, é conveniente referir que o estudo efetuado apenas tem em conta a simulação dos incrementos de tensão provocados pela passagem da carga elementar. Num ensaio em laboratório é necessário, numa fase inicial, a saturação e consolidação da amostra, reproduzindo-se assim, as condições de tensão *in-situ*. Esta questão pode ser atendida com a combinação, de uma forma adequada, da tensão axial e das pressões interna e externa, ou seja, de modo semelhante ao processo utilizado no ensaio triaxial comumente utilizado.

5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma a finalizar o presente capítulo é importante realçar que a avaliação da exequibilidade do ensaio torsional com cilindro vazado em simular as alterações do estado de tensão, através das relações existentes para a determinação das respetivas tensões, realizou-se de uma forma simplista, sem entrar em linha de conta com questões de índole mais técnica, relacionadas com a prática

laboratorial. A necessidade de um estudo mais exaustivo, se possível com a execução de ensaios de laboratório, é um fator primordial em futuras abordagens a estas matérias.

Relativamente aos resultados alcançados, estes permitem boas perspectivas para posteriores investigações, sublinhando-se a obtenção das alterações das várias componentes do estado de tensão, através da manipulação das respetivas variáveis intervenientes, muito semelhantes às obtidas com a análise numérica. Numa fase posterior, importa a análise laboratorial das mesmas, conforme referido anteriormente, averiguando as leis de degradação e acumulação de deformações permanentes com a repetição de inúmeros ciclos carga-descarga.

A confirmação de resultados satisfatórios permitirá um maior controlo sobre as opções a tomar na construção e manutenção das linhas férreas, bem como a possibilidade de realização de novas experiências com vista a encontrar novas soluções para a estrutura ferroviária, que reflitam melhor comportamento estrutural. O estudo do comportamento e adequabilidade de certos tipos de solos para estruturas desta natureza é outra potencialidade que este ensaio oferece, que, a ser explorada, pode permitir a retirada de conclusões úteis na elaboração de recomendações para a construção de vias ferroviárias.

6

CONCLUSÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES FINAIS

As alterações do estado de tensão provocadas pelo tráfego ferroviário são fenómenos de grande importância na avaliação do comportamento da estrutura ferroviária. O conhecimento do modo como essas alterações se processam mediante determinadas variáveis como, por exemplo, a velocidade de circulação e a posição relativa de um dado elemento do solo, é uma mais-valia para uma correta interpretação dos fenómenos em causa.

O Capítulo 2, sendo um capítulo introdutório e generalista no que diz respeito à estrutura da via-férrea, foi essencial para um primeiro contacto sobre a forma e as especificidades de uma estrutura ferroviária tipo, revelando-se de extrema valia na compreensão dos aspetos a ter em consideração na modelação efetuada, nos capítulos seguintes, das várias componentes da via.

O modelo numérico 2.5D FEM-PML apresentado e utilizado na realização dos estudos paramétricos efetuados revelou-se uma mais-valia, traduzindo de uma forma satisfatória o comportamento do maciço, conforme se teve a oportunidade de testar, no Capítulo 3, com base num exemplo reportado na bibliografia. O carácter tridimensional do modelo, preconizado no conceito 2.5D, tirando partido da transformada de Fourier em relação à variável tempo e espaço na direção longitudinal é um aspeto que não pode deixar de ser referido, pois é uma enorme vantagem na análise deste tipo de estruturas ao nível do esforço computacional exigido, em comparação com uma análise 3D.

Antes de se entrar nas conclusões acerca dos resultados numéricos alcançados, convém referir o trabalho inicial despendido na modelação da estrutura. A primeira questão ocorre desde logo nas dimensões da malha de elementos finitos, que apesar de existirem indicações de grandeza tipo, conforme oportunamente enumeradas, houve o cuidado de realizar estudos de sensibilidade de modo a

se obter a malha que menor esforço de cálculo exigisse e que, ao mesmo tempo, não origina-se variações significativas nos resultados, em comparação com uma malha mais densa e com condições fronteira mais alargadas. A adoção das propriedades geomecânicas fornecidas em Alves Costa (2011), ainda que de uma forma simplificada, para a modelação de toda a estrutura permitiram conferir ao trabalho um maior realismo

No que diz respeito à estratégia de representação dos resultados na forma de trajetórias de tensão, esta revelou-se acertada, permitindo uma eficaz sistematização dos resultados obtidos, com clara vantagem para estudos exaustivos. Assim, os estudos efetuados considerando apenas a atuação do conjunto de forças móveis de magnitude constante, em correspondência com a geometria dos eixos do veículo e a distribuição do peso pelos mesmos, permitiram a retirada de diversas conclusões, conforme foram sendo apresentadas ao longo de toda a exposição, referindo-se de seguida as mais pertinentes e que merecem um maior destaque:

- A forma-tipo das trajetórias de tensão representativas da passagem do comboio, para velocidades inferiores à velocidade crítica, é mantida para os mais diversos elementos do maciço de fundação, distinguindo-se claramente os ciclos carga-descarga;
- A análise da passagem de dois veículos é suficiente para a obtenção do formato da trajetória de tensão completo. A simulação de mais veículos apenas origina uma repetição dos ciclos carga-descarga;
- A velocidade de circulação é dos fatores de maior influência no comportamento do maciço. Para velocidades muito elevadas o nível de complexidade das alterações ao estado de tensão é muito complexo, com um claro aumento da tensão de corte e manutenção praticamente constante da tensão média, fator de elevado risco do ponto de vista geotécnico. Os fatores de amplificação dinâmica calculados são elucidativos deste comportamento. Verifica-se ainda que, para um nível de velocidade próximo da velocidade crítica deixa de ser possível a distinção dos ciclos carga-descarga;
- A evolução das alterações do estado de tensão em profundidade apresenta comportamentos característicos, que podem ser transmitidos pela razão de tensões, como efetuado na simulação da passagem da carga elementar;
- Para estudos com a variação da posição geométrica dos elementos do solo, em relação ao eixo de simetria, observam-se dois comportamentos distintos: i) comportamento evidenciado para velocidades onde os fenómenos de amplificação dinâmica sejam reduzidos ou até mesmo inexistentes; ii) comportamento evidenciado para velocidades próximas da velocidade crítica, onde estes efeitos dinâmicos se fazem sentir de uma forma intensa.

Os estudos paramétricos realizados considerando o efeito da interação via-veículo, materializado na geração de forças de inércia ao nível das massas do veículo, permitiram verificar o grau de influência do mecanismo de excitação dinâmico na resposta global do sistema, constituído pelo veículo, via e maciço da fundação. Conforme se teve a oportunidade de apurar, esta influência é tanto mais significativa quanto maior a frequência de oscilação da carga até um máximo que se situa no intervalo 60-70 Hz, diminuindo a partir daí, e quanto mais afastado do eixo da via se efetuar a análise, permitindo concluir que o fenómeno associado a este mecanismo apresenta uma grande prevalência na propagação de vibrações para o exterior da via-férrea, com todos os problemas daí associados. A verificação da influência do modo de modelação do material circulante permitiu ainda constatar que a modelação das massas suspensas, em condições análogos às verificadas, é apenas pertinente em gamas

de frequências reduzidas (inferiores a 10 Hz), pois a partir desses valores não se nota qualquer interferência nos resultados obtidos entre as duas análises. Sem embargo da conclusão anteriormente referida, observa-se que frequências reduzidas como as referidas têm pouca influência na alteração do estado de tensão e assim, a importância dada à modelação da caixa do veículo não deve ser tida como um aspeto fulcral na realização destas análises, permitindo uma simplificação em simulações posteriores.

A avaliação do coeficiente de majoração de tensões permitiu, para os elementos analisados, uma síntese do grau de majoração das tensões que a circulação do comboio com velocidade de 70 m/s acarreta para o maciço de fundação, em comparação com a circulação de um comboio a uma velocidade muito reduzida (10 m/s) e sem qualquer tipo de irregularidade nos carris, verificando-se majorações significativas quando consideradas elevadas frequências de oscilação da carga.

Relativamente à apresentação e descrição sumária de um ensaio laboratorial, no qual fosse possível a simulação das complexas alterações no estado de tensão provocadas pela passagem de um veículo ferroviário, mais concretamente, a rotação da direção das tensões principias em elementos do solo sob o plano de simetria, o ensaio torsional com cilindro vazado descrito mostrou-se adequado e capaz de atender aos requisitos admitidos. Assim, está-se perante uma ferramenta laboratorial capaz de auxiliar os estudos de previsão do comportamento em termos de deformações permanentes de uma via-férrea a curto/longo prazo mediante a aplicação de um dado número de ciclos de carga-descarga e com base nos resultados avaliar as melhores opções técnicas e económicas a implementar na via.

Em forma de síntese, pode afirmar-se que os objetivos principais a alcançar com a realização da presente tese de dissertação de Mestrado foram alcançados, sem esquecer o enorme contributo no aprofundamento dos conhecimentos em modelação numérica e a formação em dinâmica estrutural e geotécnica por parte do autor.

6.2. PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A problemática abordada ao longo do desenvolvimento da presente dissertação, como se teve a oportunidade de se verificar, é um assunto recente e com diversas vias de investigação pouco exploradas. Assim, e com vista a aprofundar o tema tratado, o autor propõem que se investiguem três atividades complementares que se apresentam de seguida:

- i) Estudar o comportamento da via a longo prazo, avaliando a influência das deformações permanentes;
- ii) Aprofundamento do estudo da interação veículo-via no que diz respeito à influência nas alterações ao estado de tensão, considerando as irregularidades das rodas do veículo e a utilização de perfis de irregularidades ajustados com os verificados na realidade;
- iii) Avaliar as possíveis leis de acumulação de dano com base no ensaio torsional com cilindro vazado, partindo das alterações indicativas obtidas numericamente, considerando um cálculo elástico. A possibilidade de elaboração de estudos numéricos que envolvam plasticidade também deve ser equacionada, permitindo estudos mais alargados do comportamento da estrutura ferroviária.

BIBLIOGRAFIA

- Alves Costa, P. (2005). *Escavações em solos argilosos moles Análise do comportamento considerando os efeitos da consolidação*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto.
- Alves Costa, P., Bodare, A., Calçada, R. and Silva Cardoso, A. *Um modelo de análise dinâmica de maciços sujeitos a ações de tráfego: Validação experimental.*, in 11º Congresso Nacional de Geotecnia, 2008. Coimbra.
- Alves Costa, P., Calçada, R., Silva Cardoso, A. and Bodare, A. *Influence of soil non-linearity on the dynamic response of high-speed railway tracks*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010. **30**(4): p. 221-235.
- Alves Costa, P. (2011), *Vibrações do sistema via-macizo induzidas por tráfego ferroviário. Modelação numérica e validação experimental*. Dissertação de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto.
- Alves Costa, P., Calçada, R. and Silva Cardoso, A. *Experimental validation of a 2.5D FEM-BEM model for the assessment of vibrations induced by traffic*. 3rdECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, Corfu – Greece.
- Alves Costa, P., Calçada, R. and Silva Cardoso, A. *Influence of train dynamic modelling strategy on the prediction of track-ground vibrations induced by railway traffic*. Journal of Rail and Rapid Transit, 2012, Proc IMechE Part F.
- Araújo, N. (2010), *High-Speed Trains on Ballasted Railway Track. Dynamic stress field analysis*. Doctoral Thesis in Civil Engineering, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães.
- Astley, R.J., *Infinite elements for wave problems: a review of current formulations and an assessment of accuracy*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000, **49**: p. 951-976.
- Barbosa, J., Park, J. and Kausel. E. *Perfectly matched layers in the thin layer method*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2012, **217-220**: p. 262-274.
- Brandl, H. *Geotechnical aspects for high-speed railways.*, in International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, 2004. Athens.
- Brown, S. F. *Soil mechanics in pavement engineering*. Géotechnique, 1996. **46**, No. 3, 383-426.
- Cemal Genes, M. and Kocak, S. *Dynamic soil-structure interaction analysis of layered unbounded media via a coupled finite element/boundary element/scaled boundary finite element model*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, **62** (6): p. 798–823.
- Chan, F. W. K., and Brown, S. F. *Significance of principal stress rotation in pavements*. Proc., 13th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1994, New Delhi – India, p. 1823–1826.

Chen, Y. M., C. J. Wang, Y. P. Chen and B. Zhu, *Characteristics of stresses and settlement of ground induced by train*. *Environmental Vibrations* – Takedemira (ed.), 2005, Taylor & Francis Group, London.

Dias da Silva, V. *Mecânica e Resistência dos Materiais*. EDILBER Editora, 1995, Coimbra.

Fortunato, E. (2005), *Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudos relativos à capacidade de carga*. Dissertação de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto.

François, S., Karg, C., Haegeman, W. and Degrande, G. *A numerical model for foundation settlements due to deformation accumulation in granular soils under repeated small amplitude dynamic loading*. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2009. 34: p. 273-296.

Karg, C., François, S., Haegeman, W. and Degrande, G. *Elasto-plastic long-term behavior of granular soils: Modelling and experimental validation*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010. 30: p. 635-646.

Gräbe, P. J. and Clayton, C. R. I. *Effects of principal stress rotation on permanent: Deformation in rail track foundations*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, **135**(4): p. 555-565.

Hall, L. (2000), *Simulations and Analyses of Train-Induced Ground Vibrations. A comparative study of two- and three-dimensional calculations with actual measurements*, PhD thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology (KTH). Stockholm.

Kontoe, S., Zdravkovic, S. and D. Potts, M. *An assessment of the domain reduction method as an advanced boundary condition and some pitfalls in the use of conventional absorbing boundaries*. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2009, **33**(3): p. 309-330.

Krylov, V., Dawson, A. R., Heelis, M. E. and Collop, A.C. *Rail movement and ground waves caused by highspeed trains approaching track-soil critical velocities*. *Journal of Rail and Rapid Transit – Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F*, 2000, **214**(2): p. 107-116.

Lopes, P., Alves Costa, P., Calçada, R. and Silva Cardoso, A. *Modeling of Vibrations in Tunnels using the Finite Element Method with Perfectly Matched Layers*, in *First International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, 2012, Las Palmas de Gran Canaria – Spain.

Matos Fernandes, M. *Mecânica dos Solos – Conceitos e Princípios Fundamentais*. Volume 1, FEUP edições, 2006, Porto

Powrie, W., Yang, L. A. Clayton, C.R.I. *Stress changes in the ground below ballasted railway track during train passage*. *Journal of Rail and Rapid Transit: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F*, 2007, **221**(2): p. 247-261.

Reddy, J. N. and Arbind, A. *Bending relationships between the modified couple stress-based functionally graded Timoshenko beams and homogeneous Bernoulli-Euler beams*. Annals of Solid and Structural Mechanics, 2012, p. 1-12.

Sayão, A. (1989), *Behaviour of sand under general stress paths in the hollow cylinder torsional device*. PhD thesis, Faculty of Graduate Studies – Department of Civil Engineering University of British Columbia, Columbia.

Selig, E. and Waters, J. *Track Geotechnology and Substructure Management*. Thomas Telford, London, 1994.

Sivathayalan, S., Manmatharajan, V. and Logeswaran, P. *Hollow cylinder torsional shear tests to evaluate the role of principal stress directions on cyclic resistance.*, in Pan-Am CGS Geotechnical Conference, 2011, Ontario, Canada.

White, W., Valliappan, S. and Lee, I. *Unified boundary for finite dynamic models*. Journal of Engineering Mechanics, 1977, **103**: p. 949-964.

Yang, L.A., Powrie, W. and Prierst, J.A. *Dynamic Stress Analysis of a Ballasted Railway Track Bed during the Train Passage*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(5): p.680-689.

Yang, Y. B., Hung, H. H. and Kao, J. C. *2.5D finite/infinite element approach for simulating train-induced ground vibrations.*, in The 2nd International ISCM Symposium and The 12th International EPMESC Conference, 2010, p. 5-14.

Yang, Y.B. and Hung, H.H. *A 2.5D finite/infinite element approach for modelling viscoelastic body subjected to moving loads*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **51**: p. 1317-1336.

Youd, T. L. *Compaction of sands and repeated shear straining*. J. Soil Mech. and Found, 1972, **98**(7): p. 709–725.

www.gdsinstruments.com, Holow Cylinder Apparatus, GDS Instruments. 01/06/2012.

<http://www.cp.pt>, 03/06/2012

<http://www.pandrolrahee.com/product-ballastless-sfc.html>, 15/04/2012.

<http://www.fergrupo.pt/projectos/principais-obras-realizadas/execucao-da-variante-de-alcacer-2->, 12/05/2012.

http://www.ferroclubchile.cl/vias_y_ruedas01.htm, 01/06/2012

http://www.ferroclubchile.cl/vias_y_ruedas01.htm, 01/06/2012

<http://www.sanzha.es/1-steel-rails/1-UI-rails-11.html>, 01/06/2012