



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Adriana Filipa Costa Antunes Ferreira

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA
SOLO-PRUMO EM GUARDAS DE SEGURANÇA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA
SOLO-PRUMO EM GUARDAS DE SEGURANÇA

Adriana Filipa Costa Antunes Ferreira

UMinho | 2016

dezembro de 2016



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Adriana Filipa Costa Antunes Ferreira

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA
SOLO-PRUMO EM GUARDAS DE SEGURANÇA

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Nuno Miguel Faria Araújo
Professora Elisabete Fraga de Freitas

AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer ao Professor Doutor Nuno Miguel Faria Araújo, por ter correspondido inteiramente às expectativas. Por ter demonstrado ser, para além de um bom professor, um excelente orientador. A ele agradeço-lhe a partilha de conhecimentos, os esclarecimentos, a disponibilidade, a amabilidade e a paciência. Expresso também o meu agradecimento à Professora Doutora Elisabete Fraga de Freitas.

Aos técnicos do laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho agradeço os ensinamentos transmitidos. Agradeço especialmente ao Eng. Carlos Palha a simpatia, a disponibilidade e a ajuda em todos os assuntos logísticos.

Expresso o meu agradecimento à empresa de construção e engenharia, CCR (Construções Corte Recto, Lda), pela máquina disponibilizada utilizada na escavação dos dois poços de onde foram retirados os solos considerados neste estudo.

Gostaria de demonstrar o meu agradecimento à Metalocar, empresa que concedeu os prumos utilizados neste estudo e que se disponibilizou para o processo de cravação dos mesmos. Ao Sr. José Magalhães, do departamento comercial da Metalocar agradeço os esclarecimentos prestados.

Agradeço também à empresa CJR (Cândido José Rodrigues, SA) e à Engenheira Lurdes a cedência da retroescavadora utilizada nos ensaios de campo.

Agradeço à minha família. À minha mãe devo-lhe o mais sincero agradecimento, por me ter proporcionado e apoiado em todas as decisões por mim tomadas. Agradeço-lhe ainda o acompanhamento, a constante preocupação, o amor e a dedicação demonstrada ao longo de toda a minha vida. Ao meu pai agradeço-lhe o fato de nunca ter acreditado que este momento seria por mim alcançado, talvez isso, me tenha incentivado ainda mais e me tenha feito perceber que era isto que realmente eu queria para a minha vida, ser Engenheira Civil. Aos dois agradeço-lhes por serem como são e por me terem tornado uma pessoa sensível e dedicada, mas ao mesmo tempo racional e consciente. Ao meu querido irmão agradeço-lhe aquele abraço que lhe roubava

nos momentos mais aflitivos, que me dava uma força do tamanho do mundo, mesmo sem ele saber que o fazia.

Quanto ao meu namorado e companheiro ao longo de todo este percurso académico, são poucas as palavras que possam exprimir o quão agradecida estou por te ter conhecido.

“Obrigada” pelo apoio, companheirismo, pela infindável paciência. “Obrigada” pela motivação e por nunca duidares de que seria capaz, mesmo nos momentos em que eu mais duidava. Espero que saibas que sem ti nunca teria conseguido e que não tenho dúvidas que serás um Engenheiro admirável.

RESUMO

Ao longo da área adjacente à faixa de rodagem (AAFR) são vários os dispositivos de segurança instalados para proteger tanto os ocupantes dos veículos como os peões. As guardas de segurança são um desses equipamentos e servem para reter e redirecionar um veículo em caso de despiste. Estas, antes de serem instaladas são sujeitas a ensaios de colisão à escala real, designados por ‘*crash tests*’, que permitem atestar o seu desempenho, sendo-lhes atribuída a marcação CE se cumprirem com sucesso os critérios de avaliação existentes nos documentos normativos.

No entanto, aquando a realização desses ensaios são utilizados solos de fundações controladas e de boa resistência mecânica, as quais nem sempre representam as condições verificadas *in situ*, uma vez que estas variam de local para local. Por este motivo, verifica-se a existência de um vazio técnico no processo de compatibilidade entre as condições de fundação onde são realizados os ensaios de colisão e as condições verificadas *in situ*, o que conseqüentemente pode resultar num comportamento indesejado da guarda devido ao ineficiente desempenho do sistema solo-prumo.

Uma vez que é economicamente inviável realizarem-se ensaios de colisão em cada tipo de solo encontrado ao longo a AAFR, torna-se imprescindível o desenvolvimento de metodologias numéricas capazes de avaliar o comportamento do sistema solo-prumo, sendo este o objetivo desta dissertação.

Para o desenvolvimento dessa metodologia consideraram-se dois programas de análise por elementos finitos, designados por RS² 9.0 e RS³ 1.0, nos quais foram introduzidas as respostas em termos de deslocamentos, obtidas através da realização de ensaios dinâmicos de colisão utilizando o sistema de pêndulo gravitacional e considerando dois tipos de solo e duas profundidades de cravação dos prumos, que permitiram validar a metodologia numérica desenvolvida.

Palavras-chave: Guarda de segurança; Interação solo-prumo; Ensaio dinâmico de colisão; Pêndulo gravitacional; Validação experimental; Metodologia numérica.

ABSTRACT

Along the area adjacent to the roadway there are several safety devices installed to protect vehicle occupants and pedestrians. Safety barriers are one of these devices and serve to retain and redirect a vehicle in the event of an accident. Before they are installed, they are subjected to full-scale collision tests, known as crash tests, which enable them to attest to their performance. They are assigned CE marking if they successfully meet the assessment criteria in the normative documents.

However, when conducting such tests, controlled foundation soils with good mechanical strength are used, which do not always represent the conditions verified *in situ*, because they vary from place to place. For this reason, there is a technical void in the process of compatibility between the foundation conditions, where the collision tests are performed, and the conditions verified in situ, which can result in undesired guard behaviour due to inefficient performance of the soil-post system.

Once it is economically unfeasible to carry out collision tests on each type of soil found along the area adjacent to the roadway, it is essential to develop numerical methodologies capable of evaluating the behaviour of the soil-post system, which is the purpose of this dissertation.

For the development of this methodology were considered two programs of analysis by finite elements, designated RS² 9.0 and RS³ 1.0, in which were introduced the responses in terms of displacements, obtained through the performance of dynamic collision tests, using the gravitational pendulum system and considering two types of soil and two depths of drilling of the posts, which allowed to validate the numerical methodology developed.

Keywords: Safety barriers; Soil-post interaction; Dynamic crash tests; Gravitational pendulum; Experimental validation; Numerical methodology.

ÍNDICE

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO | 1 |
| 1.1 | Contextualização..... | 1 |
| 1.2 | Objetivos..... | 2 |
| 1.3 | Organização do Documento..... | 2 |
| 1.4 | Metodologia..... | 4 |
| 2. | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 5 |
| 2.1 | Considerações gerais..... | 5 |
| 2.2 | Guardas de segurança | 6 |
| 2.3 | Normalização | 9 |
| 2.3.1 | Norma Europeia - EN 1317 | 9 |
| 2.3.2 | Norma Americana - MASH..... | 13 |
| 2.4 | Interação solo-prumo | 15 |
| 2.5 | Estudos previamente realizados a prumos | 16 |
| 2.5.1 | Michie (1970) - Estudo sobre a interação solo-prumo de prumos de madeira... 17 | |
| 2.5.2 | Gatchell & Michie (1974) - Estudo realizado para avaliar e comparar o desempenho dinâmico de prumos de madeira e de aço..... 19 | |
| 2.5.3 | Calcote & Kimball (1978) - Estudo acerca do comportamento de prumos de madeira e aço em diferentes tipos de solo | 21 |
| 2.5.4 | Eggers <i>et al.</i> (1984) - Estudo sobre prumos instalados num maciço rochoso | 23 |
| 2.5.5 | Coon <i>et al.</i> (1999) - Estudo realizado para a determinação das propriedades dinâmicas da interação solo-prumo | 25 |
| 2.6 | Modelação em elementos finitos da interação entre o prumo e o solo | 27 |
| 2.6.1 | Wu & Thomson (2007) - Estudo acerca da interação entre solo e prumo..... | 28 |
| 2.6.2 | Nauman <i>et al.</i> (2010) - Desenvolvimento de um modelo de elementos finitos (MEF) e posterior validação experimental da interação solo-prumo | 31 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3. | CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS E PRUMOS | 35 |
| 3.1 | Recolha das amostras de solo | 35 |
| 3.2 | Caracterização física dos solos | 37 |
| 3.3 | Caracterização mecânica dos solos..... | 40 |
| 3.3.1 | Ensaio de corte direto | 41 |
| 3.3.2 | Ensaio triaxial..... | 43 |
| 3.3.3 | Apresentação e análise de resultados..... | 45 |
| 3.3.4 | Síntese de resultados..... | 50 |
| 3.4 | Caracterização dos prumos | 51 |
| 4. | ENSAIOS EXPERIMENTAIS | 53 |
| 4.1 | Cravação dos prumos..... | 53 |
| 4.2 | Ensaio dinâmico de colisão - 1ª Campanha..... | 55 |
| 4.2.1 | Definição do sistema de ensaio | 56 |
| 4.2.2 | Preparação dos ensaios | 57 |
| 4.2.3 | Execução dos ensaios dinâmicos de colisão..... | 60 |
| 4.3 | Ensaio dinâmico de colisão - 2ª Campanha..... | 62 |
| 4.3.1 | Melhoramento do sistema de ensaio e dos equipamentos | 62 |
| 4.4 | Apresentação e análise dos resultados | 65 |
| 4.4.1 | Evolução da força em função do tempo ($F - t$)..... | 67 |
| 4.4.2 | Evolução dos deslocamentos ao longo do tempo ($d - t$)..... | 69 |
| 4.4.3 | Evolução da força em função do deslocamento ($F - d$)..... | 71 |
| 4.4.4 | Evolução das acelerações em função do tempo ($a_g - t$)..... | 73 |
| 4.4.4 | Deslocamento final do sistema..... | 75 |
| 5. | METODOLOGIA NUMÉRICA | 79 |
| 5.1 | Análise numérica bidimensional (RS ² 9.0)..... | 80 |
| 5.1.1 | Modelação do maciço terroso e do prumo | 80 |
| 5.1.2 | Validação do modelo | 82 |
| 5.1.3 | Aplicação dos deslocamentos dinâmicos ao prumo | 83 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.1.4 | Apresentação e análise de resultados..... | 85 |
| 5.2 | Análise numérica tridimensional (RS ³ 1.0) | 100 |
| 5.2.1 | Modelação do maciço terroso e do prumo | 100 |
| 5.2.2 | Validação do modelo | 103 |
| 5.2.3 | Aplicação do deslocamento estático ao prumo..... | 104 |
| 5.2.4 | Apresentação e análise de resultados..... | 104 |
| 6. | CONCLUSÃO..... | 112 |
| 6.1 | Considerações gerais..... | 112 |
| 6.2 | Estudos futuros | 113 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 114 |
| | ANEXO A | 120 |
| | ANEXO B | 122 |
| | ANEXO C | 124 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Tipos de guardas de segurança classificadas quanto ao seu desempenho estrutural . | 7 |
| Figura 2 - Elementos constituintes de uma guarda de segurança metálica | 7 |
| Figura 3 - Tipos de amortecedores comercializados em Portugal (Silva, 2011)..... | 8 |
| Figura 4 - Tipos de prumos utilizados ao longo da AAFR em Portugal | 8 |
| Figura 5 - Resultados em termos de forças de resistência do sistema solo-prumo (adaptado de Michie, 1970) | 18 |
| Figura 6 - Instalações do local de ensaio utilizado por Gatchell & Michie (1974)..... | 20 |
| Figura 7 - Resultados em termos de força resistente dos prumos considerados no estudo realizado por Gatchell & Michie (1974)..... | 21 |
| Figura 8 - Resultados obtidos por Calcote & Kimball (1978) relativos à força resistente do sistema solo-prumo..... | 22 |
| Figura 9 - Resultados obtidos por Calcote & Kimball (1978) em termos de deslocamento final do prumo no final dos ensaios | 22 |
| Figura 10 - a) Representação esquemática do sistema de carregamento estático utilizado; b) Registo fotográfico do sistema de carregamento estático (Eggers <i>et al.</i> , 1984)..... | 24 |
| Figura 11 - Ensaio dinâmico realizado a uma velocidade de 20 km/h (adaptado de Coon <i>et al.</i> , 1999)..... | 26 |
| Figura 12 - Resultado em termos de $F - d$ dos ensaios quase-estáticos realizados por Wu & Thomson (2007) | 28 |
| Figura 13 - Representação esquemática do sistema de ensaio utilizado na realização de ensaios dinâmicos com recurso a um veículo ‘ <i>bogie</i> ’ (adaptado de Wu & Thomson, 2007)..... | 29 |
| Figura 14 - Resultado em termos de $F - d$ dos ensaios dinâmicos realizados por Wu & Thomson (2007) | 30 |
| Figura 15 - Modelo dinâmico de elementos finitos realizado por Wu & Thomson (2007) | 30 |
| Figura 16 - Curvas $F-d$ obtidas a partir do estudo paramétrico e dos ensaios dinâmicos realizados por Wu & Thomson (2007) | 31 |
| Figura 17 - Registo fotográfico do ensaio dinâmico de pêndulo realizado por Nauman <i>et al.</i> (2010) | 32 |
| Figura 18 - Resposta em termos $a_g - t$ para um prumo cravado a 1100 mm de profundidade (Nauman <i>et al.</i> , 2010)..... | 33 |

| | |
|---|----|
| Figura 19 - Modelo de elementos finitos realizado por Nauman <i>et al.</i> (2010)..... | 33 |
| Figura 20 - Localização do solo orgânico (poço 1) e do solo residual inorgânico (poço 2), considerados na realização do estudo | 35 |
| Figura 21 - Amostras recolhidas no poço 1 (Solo orgânico)..... | 37 |
| Figura 22 - Amostras recolhidas no poço 2 (Solo residual inorgânico) | 37 |
| Figura 23 - Método utilizado para a determinação do teor em água (ω)..... | 38 |
| Figura 24 - Curvas granulométricas obtidas para os solos utilizados no estudo | 39 |
| Figura 25 - Procedimento para a preparação dos provetes a utilizar no ensaio de corte direto | 41 |
| Figura 26 - Procedimento utilizado para a realização dos ensaios de corte direto | 43 |
| Figura 27 - Preparação dos provetes utilizados na realização de ensaios triaxiais..... | 44 |
| Figura 28 - Dispositivos utilizados na realização dos ensaios triaxiais..... | 45 |
| Figura 29 - a) Evolução da tensão de corte em função do deslocamento horizontal; b) Evolução da tensão de corte em função da tensão vertical aplicada (amostra I ₁₁) | 46 |
| Figura 30 - a) Evolução da tensão de corte em função do deslocamento horizontal; b) Evolução da tensão de corte em função da tensão vertical aplicada (amostra I ₁₂) | 47 |
| Figura 31 - a) Evolução da tensão de corte em função do deslocamento horizontal; b) Evolução da tensão de corte em função da tensão vertical aplicada (amostra I ₂₂) | 48 |
| Figura 32 - a) Evolução da tensão de corte em função da extensão axial ($q - \varepsilon_a$); b) Curva $s' - t$ (amostra I ₁₃)..... | 49 |
| Figura 33 - a) Evolução da tensão de corte em função da extensão axial ($q - \varepsilon_a$); b) Curva $s' - t$ (amostra I ₂₁)..... | 50 |
| Figura 34 - Características geométricas dos prumos considerados no estudo (C 125) | 52 |
| Figura 35 - Procedimento realizado para a cravação dos prumos C 125 no solo..... | 53 |
| Figura 36 - Configuração final dos prumos cravados nos solos considerados no estudo | 54 |
| Figura 37 - Representação esquemática do sistema de pêndulo utilizado no estudo | 57 |
| Figura 38 - Massa utilizada nos ensaios | 57 |
| Figura 39 - Retroescavadora utilizada na realização dos ensaios dinâmicos de colisão | 58 |
| Figura 40 - Equipamentos utilizados na primeira campanha de ensaios | 59 |
| Figura 41 - Procedimento realizado para a calibração dos equipamentos de medição utilizados na primeira campanha de ensaios | 60 |
| Figura 42 - Procedimento adotado para a execução da primeira campanha de ensaios | 62 |
| Figura 43 - Placa metálica a utilizar numa segunda campanha de ensaios | 63 |
| Figura 44 - Suporte do sensor de posição a utilizar numa segunda campanha de ensaios | 63 |
| Figura 45 - Bússola de Geólogo proposta a utilizar numa segunda campanha de ensaios..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 46 - Acelerómetro de 50 g proposto utilizar numa segunda campanha de ensaios..... | 65 |
| Figura 47 - Sistema de batente proposto utilizar numa segunda campanha de ensaios | 65 |
| Figura 48 - Curvas $F - t$ obtidas através da realização dos ensaios de colisão aos prumos cravados no solo orgânico | 67 |
| Figura 49 - Curva $F - t$ obtida através da realização do ensaio de colisão ao prumo cravado no solo residual inorgânico..... | 68 |
| Figura 50 - Curvas $d - t$ obtidas através da realização dos ensaios de colisão aos prumos cravados no solo orgânico | 69 |
| Figura 51 - Curva $d - t$ obtida através da realização do ensaio de pêndulo ao prumo P ₁₁ cravado no solo residual inorgânico..... | 71 |
| Figura 52 - Curva $F - d$ obtida através da realização do ensaio de pêndulo aos prumos cravados no solo orgânico | 72 |
| Figura 53 - Curva $F - d$ obtida através da realização do ensaio de pêndulo ao prumo P ₁₁ cravados no solo residual inorgânico..... | 73 |
| Figura 54 - Curva obtida em termos de acelerações em função do tempo do acelerómetro colocado no ponto de impacto do prumo P ₀₄ | 74 |
| Figura 55 - Curva de aceleração em função do tempo do prumo P ₀₄ (MATLAB)..... | 75 |
| Figura 56 - Deslocamentos finais dos prumos cravados no solo orgânico..... | 76 |
| Figura 57 - Deslocamentos finais do prumo P ₁₁ cravado no solo residual inorgânico | 77 |
| Figura 58 - Resultado da modelação do solo e prumo - RS ² 9.0..... | 82 |
| Figura 59 - Evolução da tensão vertical ao longo da profundidade (Solução teórica - RS ² 9.0) | 83 |
| Figura 60 - Evolução da tensão horizontal ao longo da profundidade (Solução teórica - RS ² 9.0) | 83 |
| Figura 61 - Introdução da resposta dinâmica ($d-t$) do prumo P ₀₃ no programa - RS ² 9.0..... | 84 |
| Figura 62 - Aplicação da resposta dinâmica ($d-t$) do prumo P ₀₃ no programa - RS ² 9.0..... | 84 |
| Figura 63 - Comparação dos deslocamentos impostos no programa RS ² 9.0 com os obtidos nos ensaios dinâmicos de colisão para o prumo P ₀₃ | 85 |
| Figura 64 - Comparação da força em função do tempo ($F-t$) obtida pelo programa RS ² 9.0 com a obtida no ensaio dinâmico de colisão ao prumo P ₀₃ | 86 |
| Figura 65 - Evolução das zonas de plastificação no terreno e no prumo P ₀₃ - RS ² 9.0 | 87 |
| Figura 66 - Evolução da deformada do prumo P ₀₃ ao longo do tempo - RS ² 9.0..... | 88 |
| Figura 67 - Comparação do deslocamento final do sistema obtido com recurso ao programa RS ² 9.0 com o verificado <i>in situ</i> no prumo P ₀₃ | 89 |

| | |
|--|-----|
| Figura 68 - Comparação dos deslocamentos impostos no programa RS ² 9.0 com os obtidos nos ensaios dinâmicos de colisão para o prumo P _{O5} | 90 |
| Figura 69 - Comparação da força em função do tempo (<i>F-t</i>) obtida pelo programa RS ² 9.0 com a obtida no ensaio dinâmico de colisão ao prumo P _{O5} | 91 |
| Figura 70 - Evolução das zonas de plastificação no terreno e no prumo P _{O5} - RS ² 9.0 | 92 |
| Figura 71 - Evolução da deformada do prumo P _{O5} ao longo do tempo - RS ² 9.0 | 93 |
| Figura 72 - Comparação do deslocamento final do sistema obtido com recurso ao programa RS ² 9.0 com o verificado <i>in situ</i> no prumo P _{O5} | 94 |
| Figura 73 - Comparação dos deslocamentos impostos no programa RS ² 9.0 com os obtidos nos ensaios dinâmicos de colisão para o prumo P _{I1} | 95 |
| Figura 74 - Comparação da força em função do tempo (<i>F-t</i>) obtida pelo programa RS ² 9.0 com a obtida no ensaio dinâmico de colisão ao prumo P _{I1} | 96 |
| Figura 75 - Evolução das zonas de plastificação no terreno e no prumo P _{I1} - RS ² 9.0 | 97 |
| Figura 76 - Evolução da deformada do prumo P _{I1} ao longo do tempo - RS ² 9.0 | 98 |
| Figura 77 - Comparação do deslocamento final do sistema obtido com recurso ao programa RS ² 9.0 com o verificado <i>in situ</i> no prumo P _{I1} | 99 |
| Figura 78 - Resultado da inserção do prumo no maciço - RS ³ 1.0..... | 101 |
| Figura 79 - Resultado da aplicação das condições fronteira ao modelo de elementos finitos - RS ³ 1.0..... | 101 |
| Figura 80 - Resultado da definição da malha de elementos finitos - RS ³ 1.0 | 102 |
| Figura 81 - Evolução da tensão vertical ao longo da profundidade (Solução teórica - RS ³ 1.0) | 103 |
| Figura 82 - Evolução da tensão horizontal ao longo da profundidade (Solução teórica - RS ³ 1.0) | 103 |
| Figura 83 - Aplicação do deslocamento estático ao prumo P _{O3} no programa - RS ³ 1.0 | 104 |
| Figura 84 - Comparação da força em função do tempo (<i>F-t</i>) obtida experimentalmente com a força obtida no programa RS ³ 1.0 para o prumo P _{O3} | 105 |
| Figura 85 - Zona de plastificação do solo para o prumo P _{O3} - RS ³ 1.0 | 105 |
| Figura 86 - Comparação entre a deformada do sistema obtida para o deslocamento máximo imposto em cada programa para o prumo P _{O3} | 106 |
| Figura 87 - Comparação da força em função do tempo (<i>F-t</i>) obtida experimentalmente com a força obtida no programa RS ³ 1.0 para o prumo P _{O5} | 107 |
| Figura 88 - Zona de plastificação do solo para o prumo P _{O5} - RS ³ 1.0 | 108 |

| | |
|---|-----|
| Figura 89 - Comparação entre a deformada do sistema obtida para o deslocamento máximo imposto em cada programa para o prumo P _{O5} | 108 |
| Figura 90 - Comparação da força em função do tempo ($F-t$) obtida experimentalmente com a força obtida no programa RS ³ 1.0 para o prumo P _{I1} | 109 |
| Figura 91 - Zona de plastificação do solo para o prumo P _{I1} - RS ³ 1.0..... | 110 |
| Figura 92 - Comparação entre a deformação do sistema obtida para o deslocamento máximo imposto em cada programa para o prumo P _{I1} | 111 |
| Figura 93 - Registo fotográfico do momento imediatamente antes da massa ser largada (P _{O1}) | 121 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Conteúdos abrangidos pelas diferentes partes da EN 1317 (InIR, 2010)..... | 10 |
| Tabela 2 - Níveis de retenção de guardas de segurança (adaptado de CEN, 2010b) | 11 |
| Tabela 3 - Critérios de colisão do veículo de ensaio (adaptado de CEN, 2010b) | 11 |
| Tabela 4 - Níveis de gravidade da colisão (adaptado de CEN, 2010b)..... | 12 |
| Tabela 5 - Níveis de largura útil (W_m) (adaptado de CEN, 2010b) | 13 |
| Tabela 6 - Parâmetros em estudo nos ensaios realizados por Michie (1970)..... | 17 |
| Tabela 8 - Características dos ensaios dinâmicos realizados por Michie (1970) | 18 |
| Tabela 8 - Características dos prumos utilizados no estudo realizado por Gatchell & Michie (1974) | 19 |
| Tabela 9 - Características do sistema de pêndulo utilizado por Gatchell & Michie (1974)..... | 20 |
| Tabela 10 - Resultados dos ensaios estáticos realizados por Eggers <i>et al.</i> (1984)..... | 24 |
| Tabela 11 - Resultados dos ensaios dinâmicos realizados com o veículo ‘ <i>bogie</i> ’ (adaptado de Coon <i>et al.</i> , 1999) | 26 |
| Tabela 12 - Amostras recolhidas para a realização da caracterização física e mecânica dos solos considerados no estudo | 36 |
| Tabela 13 - Ensaio de caracterização física realizados nos solos utilizados no estudo | 38 |
| Tabela 14 - Teor em água <i>in situ</i> dos solos em estudo | 39 |
| Tabela 15 - Resultados da classificação dos solos segundo a classificação unificada revista (ASTM) | 40 |
| Tabela 16 - Ensaio de caracterização mecânica realizados nos solos utilizados no estudo.... | 41 |
| Tabela 17 - Patamares de carga considerados na realização dos ensaios de corte direto..... | 42 |
| Tabela 18 - Patamares de carga considerados na realização dos ensaios triaxiais | 44 |
| Tabela 19 - Teor em água e patamares de consolidação utilizados nos ensaios de corte..... | 46 |
| Tabela 20 - Resultados do ensaio triaxial realizado à amostra I ₁₃ | 49 |
| Tabela 21 - Resultados do ensaio triaxial realizado à amostra I ₂₁ | 50 |
| Tabela 22 - Resultados obtidos a partir da realização de ensaios de caracterização mecânica às amostras intactas recolhidas | 51 |
| Tabela 23 - Características mecânicas dos prumos considerados no estudo (C 125) | 52 |
| Tabela 24 - Designação e comprimentos de cravação de cada prumo utilizado no estudo..... | 55 |
| Tabela 25 - Condições de ensaio dos prumos considerados no estudo | 66 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 26 - Força máxima registada nos ensaios realizados a prumos cravados no solo orgânico | 68 |
| Tabela 27 - Deslocamento final do sistema obtido para cada prumo ensaiado..... | 77 |
| Tabela 28 - Propriedades dos solos utilizadas nos programas de análise numérica (RS ² 9.0 e RS ³ 1.0)..... | 79 |
| Tabela 29 - Propriedades do prumo considerado no estudo (RS ² 9.0 e RS ³ 1.0)..... | 79 |
| Tabela 30 - Prumos considerados para a realização da análise numérica | 85 |
| Tabela 31 - Resultado da determinação da força resistente da seção do prumo | 123 |

ÍNDICE DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Símbolos

A - Área

a - Comprimento não cravado do prumo

a_g ou g - Aceleração gravítica

b - Comprimento de cravação do prumo

b_r - Distância entre base do prumo e o ponto de aplicação da carga

c - Coesão

d ou δx - Deslocamento

D - Diâmetro

D_m - Deflexão dinâmica

E - Módulo de elasticidade

$E_{\text{absorvida}}$ - Energia absorvida

E_c - Energia cinética

E_{impacto} - Energia de impacto

E_p - Energia potencial gravítica

E_{sec} - Módulo de deformabilidade secante

$e_{\text{equivalente}}$ - Espessura equivalente

f - Fator empírico

f_y - Tensão de cedência

F - Força

F_{impacto} - Força de impacto

$F_{\text{máx}}$ - Força máxima

$F_{\text{resistente}}$ ou F_{Rd} - Força resistente

g - Aceleração gravítica

h - Comprimento total do prumo

h_{impacto} - Altura do ponto do ponto de impacto em relação à superfície do solo

h_{queda} - Altura de queda do pêndulo

h_{sensor} - Altura do sensor de posição em relação à superfície do solo

I - Inércia

I_{\min} - Inércia segundo o menor eixo

I_{\max} - Inércia segundo o maior eixo

K - Módulo de rigidez

K_0 - Coeficiente de impulso em repouso

m - Massa

M_{Rd} - Momento resistente

p - Profundidade

q - Tensão de corte

s - Secção transversal do prumo

t - Tempo

v - Velocidade

v_{impacto} - Velocidade de impacto

V - Volume

w_{el} - Módulo resistente elástico

W_n - Largura útil

z - Distância do centro de gravidade à primeira fibra a atingir a cedência

α - Ângulo de impacto

β - Ângulo da massa imediatamente antes da realização do ensaio

ε_a - Extensão axial

ν - Coeficiente de Poisson

ρ - Massa volúmica

σ_H - Tensão horizontal

σ_v - Tensão vertical

σ' - Tensão efetiva

τ - Tensão tangencial

ω - Teor em água do solo

ω_1 - Limite de liquidez

ω_p - Limite de plasticidade

γ - Peso volúmico

γ_d - Peso volúmico seco

Φ - Ângulo de atrito

Siglas

AAFR - Área Adjacente à Faixa de Rodagem

AE - Autoestrada
ASI - Índice de gravidade de aceleração
CE - Conformidade Europeia
CVR - Centro de valorização de resíduos
EUA - Estados Unidos da América
EN - Estrada Nacional
IP - Infraestruturas de Portugal
JAE - Junta Autónoma de Estradas
LEST - Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho
MASH - *'Manual for Assessing Safety Hardware'*
NCHRP - *'National Cooperative Highway Research Program'*
MDF - Método das diferenças finitas
MEF - Método dos elementos finitos
MVF - Método dos volumes finitos
NP - Não Plástico
PDH - Desaceleração após impacto
SRI - *'Southwest Research Institute'*
THIV - Velocidade de impacto da cabeça teórica
EU - União Europeia
UMinho (UM) - Universidade do Minho

1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

1.1 Contextualização

As guardas de segurança são um importante equipamento das vias rodoviárias, permitindo proteger os ocupantes de um veículo em caso de despiste (Wu & Thomson, 2007). A sua principal função é redirecionar um veículo descontrolado, por forma a minimizar a vulnerabilidade dos ocupantes, bem como do tráfego envolvente (Eggers *et al.*, 1984). Estas são instaladas em diferentes zonas, nomeadamente, em locais onde é necessário prevenir a colisão do veículo com obstáculos perigosos (e.g., pilar de uma ponte), prevenir a colisão com veículos que circulem em sentidos opostos e em locais onde existam taludes íngremes ou valas profundas (Borkowski *et al.*, 2014; NPRA, 2011).

Nos últimos anos, têm-se vindo a desenvolver inúmeras políticas, com o objetivo de reduzir o número de mortes nas estradas devidas a falhas dos sistemas de segurança rodoviários. No caso particular das guardas de segurança, tanto a Europa como os Estados Unidos da América (EUA), desenvolveram documentos normativos (i.e., EN 1317 e MASH, respetivamente) que determinam a sua capacidade de desempenho, tendo em conta diferentes critérios (i.e., nível de retenção, deformabilidade, nível de gravidade do embate e verificação do comportamento do veículo), através da realização de ensaios de colisão à escala real (Lima, 2006). A uma guarda de segurança que cumpra com sucesso os diferentes critérios de desempenho a que é sujeita, é-lhe atribuída marcação CE. Esta passou a ser obrigatória, no caso de dispositivos de circulação rodoviária, com a entrada em vigor do Regulamento (UE) n° 305/2011, transposto para a ordem jurídica portuguesa através Decreto-Lei n° 130/2013.

No entanto, na realização desses ensaios são utilizados solos de fundações controladas e de boa resistência mecânica, as quais nem sempre se encontram ao longo da área adjacente à faixa de rodagem (AAFR), existindo por este motivo um vazio técnico no processo de compatibilidade entre as condições de fundação onde são realizados os ensaios de colisão, dos quais resulta a homologação da guarda de segurança, e as condições verificadas *in situ*.

Com isto, o comportamento desejado da guarda pode ser comprometido pela ineficiente interação solo-prumo, pois uma pobre interação pode causar um comportamento inadequado da guarda e resultar num acidente fatal (Wu & Thomson, 2007).

Torna-se então necessário garantir que, a guarda instalada em qualquer local da AAFR apresente um desempenho semelhante ao verificado aquando a realização dos ensaios de colisão, o que na realidade não se observa.

Da problemática apresentada surge a necessidade de se avaliar o desempenho do sistema solo-prumo de guardas de segurança, recorrendo-se nomeadamente ao estabelecimento de metodologias numéricas que permitam prever o comportamento dos prumos da guarda de segurança em função da qualidade (i.e., resistência) dos solos de fundação.

1.2 Objetivos

Pretende-se com o presente estudo proceder ao desenvolvimento de uma metodologia numérica que permita a avaliação do desempenho de sistemas de segurança (i.e., mais concretamente o sistema solo-prumo), previamente normalizados, mas em condições de fundação diferentes das consideradas nos ensaios de colisão a que estes são sujeitos para a obtenção da marcação CE.

Pretende-se também validar a metodologia definida, através da realização de ensaios experimentais de colisão, comparando os resultados obtidos nestes com os obtidos na metodologia.

Por último, pretende-se retirar conclusões acerca da influência da profundidade de cravação e do tipo de solo no desempenho do sistema solo-prumo.

1.3 Organização do Documento

Este documento encontra-se dividido em 6 capítulos, cujos conteúdos são seguidamente descritos:

Capítulo 1: Este é o capítulo introdutório desta dissertação. No qual é realizada uma contextualização ao tema e são explanados os objetivos que se pretendem alcançar.

Seguidamente, é exposta a organização do documento e por último é apresentada a metodologia desta dissertação.

Capítulo 2: Neste capítulo encontra-se reunida toda a informação considerada relevante para a concretização deste estudo, que posteriormente auxiliou nas componentes práticas, análise dos resultados e conclusões do estudo. Será atribuída especial importância a matérias como: (a) considerações gerais sobre o tema; (b) guardas de segurança; (c) normalização existente para a avaliação do desempenho das guardas de segurança; (d) principais aspetos relativos à interação solo-prumo; (e) estudos previamente realizados por diferentes autores a prumos de guardas de segurança; (f) estudos sobre modelação em elementos finitos do sistema solo-prumo.

Capítulo 3: Neste capítulo é descrita a metodologia seguida para a caracterização física e mecânica dos solos utilizados no estudo e são apresentados e analisados os seus resultados. Ainda neste capítulo, são apresentadas as características mecânicas e geométricas dos prumos utilizados no estudo.

Capítulo 4: Neste capítulo são apresentadas as metodologias utilizadas para a realização de ensaios dinâmicos de colisão realizados em condições de fundação controlada, por forma a atestar a qualidade da metodologia numérica a desenvolver. São também apresentados e analisados os resultados obtidos.

Capítulo 5: Neste capítulo são apresentadas todas as etapas seguidas para a definição de uma metodologia numérica que permita avaliar o desempenho do sistema solo-prumo em guardas de segurança, utilizando os programas de elementos finitos RS² 9.0 e RS³ 1.0, desenvolvidos pela Rocscience. Para se analisar a eficiência da metodologia numérica desenvolvida, comparam-se, ainda neste capítulo, os resultados obtidos nesta com os obtidos na realização dos ensaios dinâmicos de colisão.

Capítulo 6: Neste último capítulo estão presentes e são explanadas de forma crítica as principais conclusões obtidas. São também sugeridos estudos que possam ser desenvolvidos futuramente.

1.4 Metodologia

De modo a que os objetivos anteriormente enunciados sejam cumpridos, começou-se por realizar uma exaustiva pesquisa bibliográfica incidindo esta especialmente em estudos realizados a prumos de guardas de segurança. Para a realização desta pesquisa recorreu-se essencialmente a documentos normativos, artigos científicos, monografias e dissertações de mestrado. A informação recolhida nesta fase foi imprescindível para a estabelecimento da metodologia a seguir na presente dissertação.

Após a realização da pesquisa bibliográfica, foram selecionados dois locais com características geotécnicas distintas. Nesses locais foram recolhidas amostras para a caracterização física e mecânica dos solos. A caracterização física dos solos foi feita através da realização dos seguintes ensaios: teor em matéria orgânica, teor em água, limites de consistência, análise granulométrica. Com a execução de ensaios de corte direto e triaxiais fez-se a caracterização mecânica dos solos. A realização destes ensaios teve como objetivo determinar as características de resistência e deformabilidade dos solos utilizadas como parâmetros de entrada na metodologia numérica a desenvolver.

Após a confirmação da adequação dos solos para o estudo, procedeu-se à cravação dos prumos nos solos recorrendo a equipamento utilizado vulgarmente nesta tarefa em obra (i.e., um bate-estacas). Entretanto, com base na informação obtida através da pesquisa bibliográfica efetuada e tendo em conta as condições de execução possíveis, selecionou-se o sistema de pêndulo gravitacional para a realização dos ensaios dinâmicos de colisão. Após as devidas adaptações do método às condições disponíveis, realizaram-se os ensaios de colisão. A informação recolhida serviu posteriormente para validar a metodologia numérica a desenvolver.

Para a elaboração da metodologia numérica recorreu-se aos programas de análise por elementos finitos RS² 9.0 e RS³ 1.0. Os pressupostos do método foram validados através da comparação dos resultados obtidos numericamente com os obtidos experimentalmente.

Após ser estabelecida e validada a metodologia, foi possível avaliar o desempenho do sistema solo-prumo, considerando duas profundidades de cravação dos prumos e para os dois solos analisados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações gerais

Os principais objetivos a serem considerados aquando a realização do projeto de uma estrada são, a prevenção da ocorrência de erros por parte do condutor e a mitigação das consequências advindas desses (Roque, 2004; Vinagre, 2013).

No que concerne à mitigação das consequências resultantes dos acidentes rodoviários, a norma europeia (i.e., CEN (2010a)), prevê a instalação de vários sistemas de retenção rodoviários ao longo das estradas. Segundo a mesma norma, estes sistemas podem dividir-se em duas classes dependendo do elemento a proteger, os sistemas de retenção de veículos e os sistemas de retenção de peões. Na primeira englobam-se as guardas de segurança, os terminais, as transições, as barreiras amovíveis e os amortecedores de impacto. Na segunda incluem-se os muros de guarda e os guarda corpos para peões (Ehlers, 2010).

Quanto às guardas de segurança, o seu principal objetivo, não é o de impedir a ocorrência do acidente, mas de minorar a sua gravidade, contendo e redirecionando o veículo de volta à faixa de rodagem (Hascall *et al.*, 2007; CEN, 2010a). Aquando a ocorrência de uma colisão entre um veículo e uma guarda, a energia cinética (E_c) do veículo é transformada em energia de deformação da guarda e energia de deformação elástica e plástica do veículo (Armstrong *et al.*, 1985; Lima, 2006), sendo esta fase designada por compressão. Esta termina quando é atingida uma deformação dinâmica máxima, e a seguir a esta, segue-se uma fase de restituição, onde os materiais recuperam parte da deformação sofrida (Ribeiro, 2014).

Tem-se verificado, no entanto, que o desempenho das guardas de segurança é muito diferente do pretendido, uma vez que este está dependente de uma interação dinâmica entre o solo e o prumo (Michie, 1970). Esta interação está diretamente relacionada com as propriedades mecânicas do solo e do prumo, da geometria da secção transversal do prumo e com a sua profundidade de cravação no solo (Eggers & Hirsch, 1986).

Relativamente ao prumo, o seu material e geometria podem ser definidos aquando a conceção do sistema, ao contrário do que acontece com o solo, pois as propriedades mecânicas deste não podem ser definidas previamente (Wu & Thomson, 2007).

Antes de serem colocadas ao longo das estradas, as guardas de segurança são homologadas através da realização de ensaios de colisão (i.e., ‘*crash tests*’) (Tavares, 2012). Estes ensaios são utilizados para avaliar o desempenho de novos dispositivos de segurança rodoviária (Gutkowski et al., 2007). No entanto, devido à elevada quantidade de ensaios requeridos com diferentes condições (e.g., ângulo de impacto, classe do veículo e tipo de solo), está associado um custo significativo a estes (Consolazio *et al.*, 2012). Sempre que possível, uma guarda de segurança deve ser ensaiada de acordo com as condições de solo que repliquem as condições normais de serviço. No entanto, e infelizmente, as condições do solo variam com hora e local, e até mesmo dentro de uma pequena área geográfica (NCHRP, 1993), sendo por esse motivo, inexequível realizarem-se ensaios de colisão para todas as condições de serviço existentes (Tabiei & Wu, 2000).

2.2 Guardas de segurança

Existem diversas formas de classificação das guardas de segurança, podendo estas ser designadas quanto ao tipo de material, quanto ao tempo de vida útil e quanto ao seu desempenho estrutural.

Relativamente ao tipo de material, as guardas mais comuns em Portugal são as metálicas. No entanto, existem também guardas de madeira, de betão e híbridas (Silva, 2011). Quanto ao tempo de vida útil estas podem ser permanentes ou temporárias (InIR, 2010) e relativamente ao seu desempenho estrutural, estas podem ser classificadas em 3 grupos:

- a) Flexíveis (Figura 1a);
- b) Semi-flexíveis (Figura 1b);
- c) Rígidas (Figura 1c).

Tipicamente em Portugal, as guardas colocadas ao longo da área adjacente à faixa de rodagem (AAFR) são as semi-flexíveis de perfil em ‘W’ ou onda dupla (Lima, 2006).

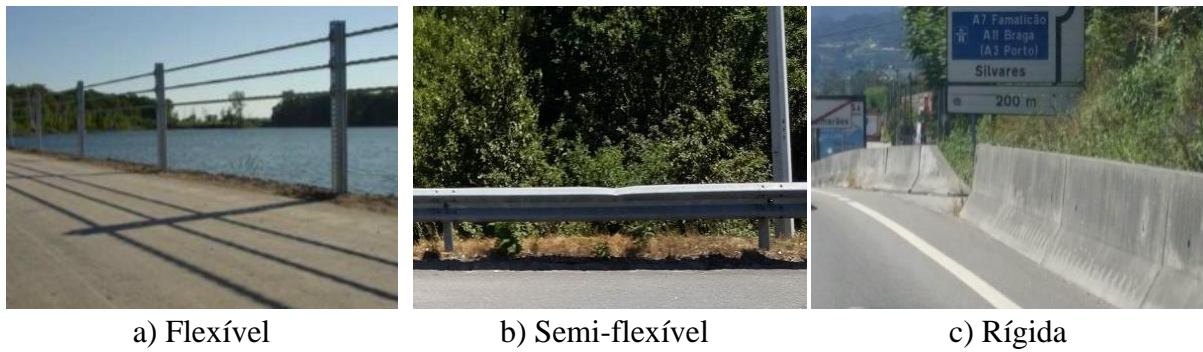


Figura 1 - Tipos de guardas de segurança classificadas quanto ao seu desempenho estrutural

Segundo a AFNOR (1991), uma guarda de segurança metálica é constituída por 4 elementos, a viga longitudinal, o amortecedor, os elementos de ligação (i.e., parafusos e as respetivas porcas) e os prumos (Figura 2).



Figura 2 - Elementos constituintes de uma guarda de segurança metálica

Quanto à viga longitudinal, é o local onde um veículo desgovernado colide com o sistema de segurança e é o componente que mais energia cinética (E_c) proveniente do veículo absorve.

Relativamente ao amortecedor, este funciona como elemento de ligação entre a viga longitudinal e os prumos. É responsável por absorver alguma da energia de impacto e distribuí-la pelos prumos (Gulbenkian, 2011; Tavares, 2012). Em Portugal, os amortecedores mais comercializados são do tipo II (Figura 3a), utilizados quando a viga longitudinal é em 'W', existindo também do tipo 'U' (Figura 3b) e do tipo passagem de emergência (Figura 3c), que permite a sua rápida desmontagem (Silva, 2011).

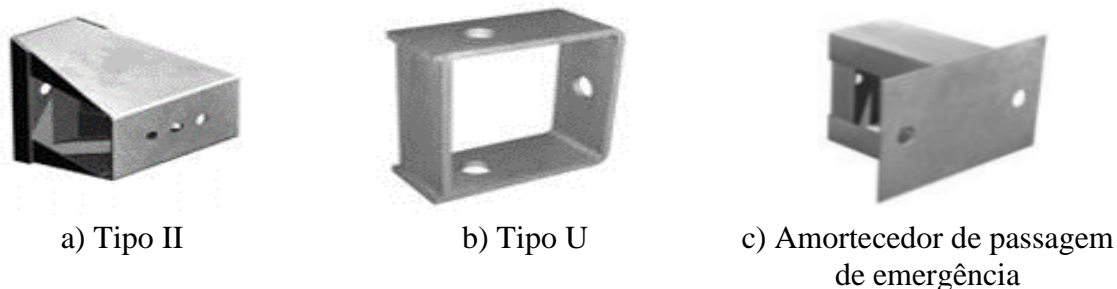


Figura 3 - Tipos de amortecedores comercializados em Portugal (Silva, 2011)

Os prumos têm como principal objetivo ancorar o sistema de guarda de segurança ao solo. Para além disso, são responsáveis por absorver parte da energia de impacto e transmiti-la ao solo (Gulbenkian, 2011). Em Portugal, são utilizados 2 tipos de prumos, designados por UPN 120 (Figura 4a) e C 125 (Figura 4b).

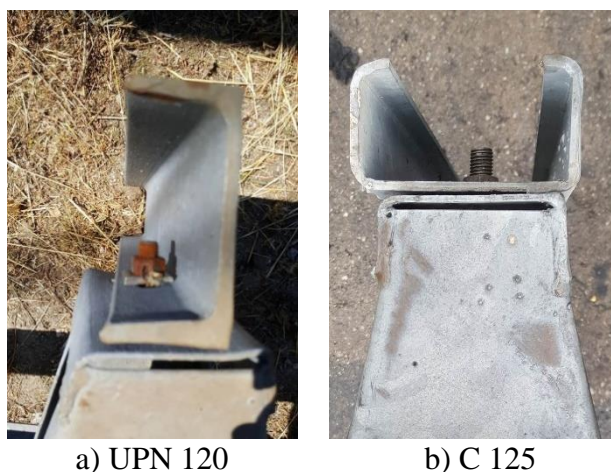


Figura 4 - Tipos de prumos utilizados ao longo da AAFR em Portugal

Começou-se por utilizar como prumo de suporte das guardas de segurança o perfil siderúrgico normalizado UPN 120, que é instalado segundo o eixo de maior inércia, ou seja, com a alma do perfil posicionada perpendicularmente à face da viga longitudinal. Posteriormente, adotou-se a utilização do perfil C 125, que se trata não de um perfil siderúrgico, mas sim de uma ‘calha’, fabricada por processo de perfilagem a partir de chapa em rolo, cuja instalação é realizada segundo o eixo de menor inércia, ou seja, com a alma do perfil paralela à viga longitudinal.

A primeira solução (i.e., UPN 120) foi introduzida nas infraestruturas da antiga Junta Autónoma de Estradas (JAE) e a segunda (i.e., C 125), foi adotada preponderantemente pelas infraestruturas da BRISA. Parecendo um contra censo a utilização de um perfil mais rígido nas vias onde são praticadas menores velocidades e um perfil mais flexível nas vias em que são

permitidas maiores velocidades, a verdade é que naquela altura, a JAE privilegiava a resistência do material, com prejuízo para os ocupantes do veículo, uma vez que este perfil obrigava a que fosse o veículo a absorver a maior quantidade de energia do impacto, enquanto que a BRISA optou por uma solução com maior capacidade de absorção de energia, logo com maior vantagem para os ocupantes do veículo. Sendo maior a área adjacente à faixa de rodagem disponível nas Autoestradas (AE) que nas Estradas Nacionais (EN), optou-se desde então pela utilização do perfil C 125.

Segundo a AFNOR (1991), todos os constituintes de uma guarda de segurança são fabricados em aço do tipo S235JR, com uma massa volúmica $\rho = 7,86 \text{ Mg/mm}^3$, módulo de elasticidade $E = 210 \text{ GPa}$, coeficiente de Poisson $\nu = 0,30$ e tensão de cedência $f_y = 235 \text{ MPa}$.

2.3 Normalização

Nos últimos anos, os ensaios de colisão à escala real são a forma existente de se certificar o desempenho e as características dinâmicas dos vários dispositivos de segurança existentes nas estradas (Atahan, 2002; Soltani *et al.*, 2011). O objetivo destes é o de simular um acidente rodoviário, num ambiente controlado e assim se obterem informações acerca do comportamento do sistema de guarda de segurança, do veículo e dos seus ocupantes aquando uma colisão (Ribeiro, 2014).

Para a realização destes ensaios, a Europa e os Estados Unidos da América desenvolveram documentos normativos, com o objetivo de se atestar o funcionamento dos sistemas de guardas de segurança (e outros sistemas de retenção rodoviários) sendo eles:

- a) Norma Europeia EN 1317 - 'Sistemas de retenção das estradas';
- b) Norma Americana AASHTO - '*Manual for Assessing Safety Hardware*' (MASH).

2.3.1 Norma Europeia - EN 1317

Relativamente à legislação europeia, esta norma, desenvolvida pelo Comité Técnico CEN/TC 226 'Equipamento Rodoviário', está compreendida em 8 partes, cujos conteúdos se encontram resumidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Conteúdos abrangidos pelas diferentes partes da EN 1317 (InIR, 2010)

| Parte | Conteúdo abrangido |
|--------------|---|
| 1 | Terminologia e critérios gerais dos métodos utilizados nos ensaios de colisão |
| 2 | Classes de desempenho, critérios de aceitação dos ensaios de colisão e métodos de ensaio para guardas de segurança |
| 3 | Classes de desempenho, critérios de aceitação dos ensaios de colisão e métodos de ensaio para amortecedores de choque |
| 4 | Classes de desempenho, critérios de aceitação dos ensaios de colisão e métodos de ensaio para terminais e transições |
| 5 | Requisitos, durabilidade e avaliação da conformidade dos produtos |
| 6 | Sistemas de retenção para peões, guardas de proteção para peões |
| 7 | Atualização da parte 4 no que diz respeito aos terminais de guardas de segurança |
| 8 | Sistemas de retenção para motociclos |

Relativamente ao local do ensaio, a norma define que na área de aproximação do veículo à guarda e na área de saída do veículo após a colisão, não deverão existir inclinações superiores a 2,5%. Para além disso, a área deverá ser pavimentada e rígida e estar isenta de detritos, poeiras, água, neve ou gelo no momento da realização do ensaio. As dimensões desta superfície devem ser as suficientes para permitir que, de forma controlada, o veículo acelere até à velocidade definida para o ensaio, para que a abordagem e saída do veículo seja estável.

Os critérios considerados por esta para a avaliação do desempenho das guardas de segurança, identificação das suas classes técnicas e definição dos seus limites de aceitação são os seguintes (InIR, 2010; CEN, 2010b):

- a) Nível de retenção;
- b) Nível de gravidade do embate;
- c) Deformabilidade;
- d) Verificação do comportamento do veículo.

Nível de retenção

O nível de retenção corresponde à capacidade de retenção e redireccionamento da guarda quando sujeita à colisão de um veículo com uma determinada massa (m), velocidade (v) e ângulo de impacto (α). A partir das condições de ensaio descritas nas Tabelas 2 e 3, é possível determinar o nível de retenção de um sistema de guarda de segurança.

Na Tabela 2, são definidas as combinações de ensaio necessárias realizar para a verificação de um determinado nível de retenção.

Tabela 2 - Níveis de retenção de guardas de segurança (adaptado de CEN, 2010b)

| Níveis de retenção | Ensaio de aceitação |
|-----------------------------|----------------------------|
| Retenção num ângulo fechado | |
| T1 | TB21 |
| T2 | TB22 |
| T3 | TB41 e TB 21 |
| Retenção normal | |
| N1 | TB31 |
| N2 | TB32 e TB11 |
| Retenção mais elevada | |
| H1 | TB42 e TB11 |
| H2 | TB51 e TB11 |
| H3 | TB61 e TB11 |
| Retenção muito elevada | |
| H4a | TB71 e TB11 |
| H4b | TB81 e TB11 |

As condições de ensaio para os diferentes níveis de retenção definidos na norma, em termos de velocidade (v), ângulo de impacto (α) e massa (m) do veículo, encontram-se sintetizadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Critérios de colisão do veículo de ensaio (adaptado de CEN, 2010b)

| Ensaio | v (km/h) | α (°) | m (kg) | Tipo de veículo |
|---------------|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| TB 11 | 100 | 20 | 900 | Automóvel |
| TB 21 | 80 | 8 | 1300 | Automóvel |
| TB 22 | 80 | 15 | 1300 | Automóvel |
| TB 31 | 80 | 20 | 1500 | Automóvel |
| TB 32 | 110 | 20 | 1500 | Automóvel |
| TB 41 | 70 | 8 | 10000 | Pesado de Mercadorias Rígido |
| TB 42 | 70 | 15 | 10000 | Pesado de Mercadorias Rígido |
| TB 51 | 70 | 20 | 13000 | Autocarro |
| TB 61 | 80 | 20 | 16000 | Pesado de Mercadorias Rígido |
| TB 71 | 65 | 20 | 30000 | Pesado de Mercadorias Rígido |
| TB 81 | 65 | 20 | 38000 | Pesado de Mercadorias Articulado |

Tomando como exemplo o nível de retenção H3, terá de ser verificada a capacidade de retenção do sistema para o ensaio TB 61, que corresponde a um veículo pesado rígido de 16000 kg, e para o ensaio TB 11, que corresponde a um veículo de 900 kg.

Nível de gravidade do embate

Quanto ao nível de gravidade do embate, este é definido como o risco de lesão para os ocupantes do veículo. De acordo com a norma, a gravidade do embate, é classificada em três níveis de avaliação de risco, baseados fundamentalmente nas acelerações medidas ao nível do centro de gravidade do mesmo. A gravidade do embate é calculada através dos seguintes índices:

- a) Índice de gravidade de aceleração (ASI);
- b) Velocidade de impacto da cabeça teórica (THIV);
- c) Desaceleração pós-impacto da cabeça (PDH).

A norma classifica a gravidade do embate em 3 classes, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Níveis de gravidade da colisão (adaptado de CEN, 2010b)

| Nível de gravidade do embate | Valor dos índices |
|-------------------------------------|--|
| <i>A</i> | $ASI \leq 1,0$ |
| <i>B</i> | $ASI \leq 1,4$ $THIV \leq 33 \text{ km/h}$ |
| <i>C</i> | $ASI \leq 1,9$ |

O nível de gravidade de embate *A* proporciona um maior nível de segurança para o ocupante do que o nível *B*, e o nível *B* maior do que o nível *C*.

Deformabilidade

Relativamente à deformação dos sistemas de retenção, nomeadamente das guardas de segurança durante os ensaios de colisão, é caracterizada pela deflexão dinâmica (D_m) e a largura útil (W_m). Estes dois parâmetros permitem determinar o espaço lateral necessário para que o sistema funcione adequadamente. De acordo com a mesma norma, os níveis de largura útil são definidos em oito classes, conforme se verifica na Tabela 5.

Tabela 5 - Níveis de largura útil (W_m) (adaptado de CEN, 2010b)

| Classes dos níveis de largura útil | W_m (m) |
|---|-----------------------------|
| W1 | $W_m \leq 0,6$ |
| W2 | $W_m \leq 0,8$ |
| W3 | $W_m \leq 1,0$ |
| W4 | $W_m \leq 1,3$ |
| W5 | $W_m \leq 1,7$ |
| W6 | $W_m \leq 2,1$ |
| W7 | $W_m \leq 2,5$ |
| W8 | $W_m \leq 3,5$ |

Verificação do comportamento do veículo

Com este critério pretende-se ter em conta os movimentos do veículo depois de redirecionado pela guarda, de modo a que estes não ponham em causa a vida dos seus ocupantes. Para tal, são verificados os seguintes critérios:

- a) O centro de gravidade do veículo não deve cruzar o eixo da guarda deformada;
- b) O veículo não deve capotar durante ou após a colisão.

2.3.2 Norma Americana - MASH

A norma que se pretende agora explicar, foi desenvolvida pelo 'National Cooperative Highway Research Program' (NCHRP), nos Estados Unidos. Esta contém os procedimentos recomendados para avaliar o desempenho de segurança dos vários sistemas de retenção nas estradas. O seu objetivo é a uniformização dos procedimentos realizados nos ensaios de colisão.

Quanto ao local de ensaio, a norma define que deverá ser utilizada uma superfície plana, de preferência pavimentada quando se estiver a acelerar o veículo de ensaio até à velocidade desejada. Esta superfície não poderá possuir quaisquer irregularidades que possam influenciar o comportamento do veículo durante e após a colisão, exceto quando as condições de ensaio exijam o contrário.

Uma das grandes vantagens desta norma em relação à Europeia, é o fato desta ter em consideração a interação dinâmica entre o solo e o prumo. Referindo que sempre que possível, estes elementos devem ser ensaiados de acordo com as condições de solo que repliquem as

encontradas *in situ*. No entanto, como já foi referido estas condições variam, existindo a necessidade de padronizar as condições do solo para a realização dos ensaios. Quanto ao solo normalizado, a norma recomenda que satisfaça as especificações da AASHTO para '*Materials for Aggregate and Soil Aggregate Subbase, Base and Surface Courses*'.

Para avaliar o desempenho de um sistema de guarda de segurança, esta norma define 3 critérios (Engstrand, 2000):

- a) Adequação estrutural do sistema de segurança;
- b) O risco para os ocupantes do veículo;
- c) O comportamento do veículo após a colisão.

Dependendo do sistema de segurança a ser avaliado, existem até seis níveis de ensaios que podem ser considerados. Os sistemas qualificados com os níveis 1 ou 2 deverão ser considerados aceitáveis para a maioria das estradas locais, com baixo volume de tráfego e de velocidade. No caso de sistemas a aplicar em vias onde são praticadas altas velocidades, o nível de qualificação deverá ser o 3. O nível 4, 5 e 6, são aplicados apenas a guardas longitudinais, e deverão ser determinados tendo em consideração o volume tráfego pesado e/ou as consequências da penetração do veículo para além da guarda longitudinal.

Para além dos ensaios de colisão à escala real apresentados, são definidos por esta norma, outros 4 tipos de ensaios dinâmicos, que permitem estudar e avaliar os vários componentes dum dispositivo de segurança (e.g., os prumos, no caso das guardas de segurança), sendo eles:

- a) Pêndulo gravitacional;
- b) Dispositivo de ensaio dinâmico;
- c) Modelo de escala reduzida;
- d) Ensaio dinâmico com utilização de um veículo '*bogie*'.

Pêndulo gravitacional

A configuração deste tipo de ensaio consiste numa massa de tamanho considerável que é suspensa verticalmente por cabos. A velocidade da massa no momento do impacto (v_{impacto}) é regida pela expressão (1).

$$v_{\text{impacto}} = \sqrt{2gh_{\text{queda}}} \quad (1)$$

Onde,

g - Aceleração gravítica (9,81 m²/s);

h_{queda} - Altura de queda da massa.

Os pêndulos gravitacionais são comumente utilizados para avaliar o desempenho do elemento a ensaiar a velocidades de colisão inferiores a 40 km/h. O principal problema associado a este ensaio é o tipo de superfície na qual a massa irá colidir. Uma superfície rígida aumenta significativamente as forças de impacto (F_{impacto}), reduzindo a dissipação de energia durante o ensaio. Já uma superfície excessivamente flexível minimiza as forças de impacto, maximizando a dissipação de energia.

Estes ensaios são frequentemente utilizados para avaliar partes de sistemas de retenção (e.g., prumos) pois estes, geralmente absorvem mais energia durante colisões a baixas velocidades, do que durante colisões a altas velocidades. Como resultado, o sistema de pêndulo gravitacional é um método economicamente acessível para se avaliar o desempenho dos prumos de guardas de segurança, em alternativa aos ensaios realizados à escala real.

Ensaio dinâmico com utilização de um veículo 'bogie'

Um veículo 'bogie' consiste numa estrutura assente sobre 4 rodas e com uma massa equivalente à do veículo que se pretende representar. Geralmente, para a realização da colisão do veículo no elemento a ensaiar (e.g., prumo), este é guiado por carris, com recurso a controlo remoto e à velocidade pretendida. À parte frontal do veículo é adicionado um dispositivo de embate de rigidez (K) equivalente à do veículo que se pretende representar. Este sistema tem sido utilizado tanto em ensaios de altas como de baixas velocidades. No entanto, a realização de ensaios com este dispositivo não permite avaliar todos os critérios de avaliação de desempenho considerados num ensaio à escala real, nomeadamente, o risco para os ocupantes do veículo e o comportamento deste após a colisão.

2.4 Interação solo-prumo

Num primeiro olhar para uma guarda de segurança rodoviária poder-se-ia ser levado a considerar que a interação solo-prumo é feita através de um encastramento. No entanto, o solo possui uma rigidez quantificada e a partir de um certo nível de tensão começa a ceder

(Gulbenkian, 2011). O desempenho do sistema solo-prumo depende das propriedades do prumo (i.e., a resistência do material e a sua seção transversal) e do solo (i.e., da resistência ao corte e da densidade). Variações na resistência do solo e na profundidade de cravação têm um efeito significativo no desempenho do sistema (Bligh *et al.*, 2004)

Tipicamente, nas guardas de segurança das estradas, os prumos estão sujeitos a forças horizontais, aplicadas dinamicamente sobre eles. Sob a ação destas cargas, os prumos podem-se comportar de 3 modos distintos (Kuipers & Reid, 2003):

- a) Deformar elasticamente;
- b) Deformar plasticamente;
- c) Inclinar devido à baixa resistência do solo adjacente.

Na realidade, o prumo não exhibe em particular nenhuma destas respostas, mas uma combinação das três (Michie, 1970).

2.5 Estudos previamente realizados a prumos

Na realização de ensaios a prumos, pode ser executado um carregamento estático ou um dinâmico.

Na primeira situação, o prumo é cravado no solo ou encastrado numa base rígida e é-lhe aplicada uma carga monotónica, até ocorrer a rotura do sistema. À medida que a carga vai aumentando, são registadas as deformações ocorridas. A partir dos resultados de força em função do deslocamento ($F-d$) obtidos do ensaio, são calculados os valores utilizados como parâmetros de entrada em simulações computacionais. Estes valores, embora sejam de fácil obtenção, não replicam a carga a que uma guarda de segurança está realmente sujeita aquando a colisão de um veículo.

Na segunda, o prumo cravado no solo ou encastrado numa base rígida é sujeito a uma colisão, sendo a sua resposta dinâmica a que replica mais fidedignamente a força (F) que realmente atua no prumo aquando a colisão no mesmo. Contudo, esta é muito mais difícil de determinar (Bierman *et al.*, 1996).

Nos pontos seguintes encontram-se alguns dos estudos mais relevantes sobre a interação solo-prumos já realizados.

2.5.1 Michie (1970) - Estudo sobre a interação solo-prumo de prumos de madeira

Em 1970, Michie, através de um estudo realizado para o ‘*Southwest Research Institute*’ (SRI), executou uma série de ensaios, estáticos e dinâmicos, com o objetivo de estudar o comportamento da interação solo-prumo, em prumos de madeira de guardas de segurança. Os ensaios foram realizados utilizando-se 3 tipos de secção transversal do prumo (s), 3 profundidades de cravação (b) e dois tipos de solo (i.e., uma areia e um seixo), para fornecer diferentes resistências do solo.

Na Tabela 6, encontram-se resumidos os parâmetros em estudo nos ensaios realizados por este autor.

Tabela 6 - Parâmetros em estudo nos ensaios realizados por Michie (1970)

| Tipo de solo | s (mm × mm) | b (mm) |
|---------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| | 100 × 100 | |
| Areia e seixo | 150 × 150 | 500, 750 e 1000 |
| | 200 × 200 | |

Na realização dos ensaios estáticos, foi utilizada uma estrutura sobre carris que permitiu empurrar o prumo a uma velocidade constante.

Quanto aos ensaios dinâmicos, estes foram executados com recurso ao sistema de pêndulo gravitacional. O autor seleccionou a altura de queda da massa (h_{queda}) e ao sinal de um engenheiro presente no ensaio, esta foi solta através de um mecanismo de libertação rápida. Na Tabela 8 encontra-se o valor da massa (m) utilizada bem como as velocidades de impacto (v_{impacto}) a que os prumos foram ensaiados.

Tabela 7 - Características dos ensaios dinâmicos realizados por Michie (1970)

| Material do pêndulo | m (kg) | v_{impacto} (km/h) |
|---------------------|-------------|--------------------------------|
| Betão armado | 1815 | 17, 22 e 33 |

A escolha desta massa foi justificada por Michie (1970) como sendo representativa do peso de um veículo de passageiros de tamanho médio naquela época.

Na Figura 5, são apresentados os resultados dos ensaios dinâmicos realizados aos prumos cravados nos dois tipos de solo considerados, em termos de força resistente do sistema ($F_{\text{resistente}}$).

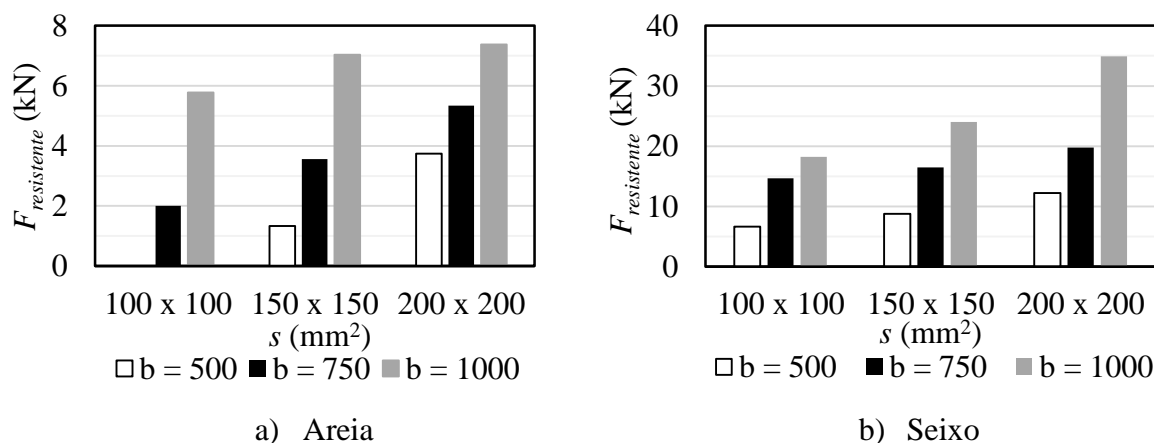


Figura 5 - Resultados em termos de forças de resistência do sistema solo-prumo (adaptado de Michie, 1970)

Com a realização deste estudo o autor concluiu que a resposta dinâmica do sistema estava diretamente relacionada com o tipo de solo utilizado, profundidade de cravação (b) e secção transversal do prumo (s). Verificou também que dos parâmetros em estudo, o tipo de solo e a profundidade de cravação foram os mais influentes, enquanto que a secção transversal não interferiu tanto nos resultados. Para além disso, constatou também que a capacidade resistente do sistema aumentava com o aumento da profundidade de cravação do prumo.

2.5.2 Gatchell & Michie (1974) - Estudo realizado para avaliar e comparar o desempenho dinâmico de prumos de madeira e de aço

Em 1974, foram realizados por Gatchell & Michie (1974) uma série de ensaios de colisão com recurso ao sistema de pêndulo gravitacional, com objetivo de avaliar e comparar o desempenho dinâmico de prumos de guardas de segurança em madeira (i.e., pinheiro do sul e carvalho vermelho) com prumos de aço. Na Tabela 8, encontram-se as características dos prumos ensaiados.

Tabela 8 - Características dos prumos utilizados no estudo realizado por Gatchell & Michie (1974)

| Designação | s (mm) | Material do prumo |
|------------|-------------|-----------------------|
| CV66 | 150 × 150 | Carvalho Vermelho |
| CV 68 | 150 × 200 | Carvalho Vermelho |
| PS 66 | 150 × 150 | Pinheiro do Sul |
| PS 68 | 150 × 200 | Pinheiro do Sul |
| PSd 68 | 150 × 200 | Pinheiro do Sul denso |
| PS 86 | 150 × 200 | Pinheiro do Sul |
| S3 × 5,7 | S3 × 5,7 | Aço |
| W6 × 8,5 | W6 × 8,5 | Aço |

Para realizar os ensaios com recurso ao pêndulo gravitacional, os autores construíram uma estrutura de madeira capaz de suportar a massa (m) a utilizar. Essa massa foi suspensa a uma altura de 7,92 m e a colisão com os prumos deu-se no ponto mais baixo do arco do pêndulo, onde a energia cinética (E_c) seria máxima e a energia potencial gravítica (E_p) seria nula.

A Figura 6 corresponde a um registo fotográfico das instalações utilizadas nos ensaios realizados por Gatchell & Michie (1974).

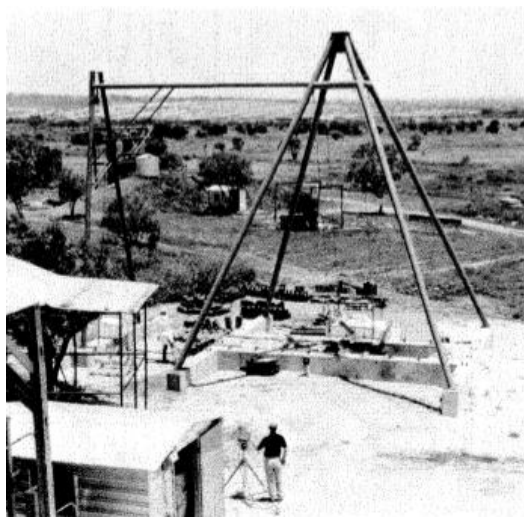


Figura 6 - Instalações do local de ensaio utilizado por Gatchell & Michie (1974)

Relativamente à massa do sistema de pêndulo, consistiu num bloco de betão armado reforçado. Nestas condições, a velocidade de impacto (v_{impacto}) dos ensaios foi aproximadamente 32 km/h. Na Tabela 9, encontram-se resumidas as características do sistema de pêndulo utilizado pelos autores para a realização dos ensaios.

Tabela 9 - Características do sistema de pêndulo utilizado por Gatchell & Michie (1974)

| Material | m (kg) | Dimensões da massa (mm) | v_{impacto} (km/h) |
|-----------------|--------------------------------|------------------------------------|---|
| Betão armado | 1800 | 914,4 × 1828,8 × 457,2 | ≈ 32 |

Para realizar o contacto entre a massa e o prumo, foi anexado à parte frontal da massa, um perfil de aço preenchido com betão. Relativamente aos prumos, nos de madeira, foi colocado neoprene, e nos de aço, um bloco de madeira, em ambos os casos para agirem como atenuadores da força inicial, na zona de colisão.

Como o objetivo deste estudo não foi o de avaliar a interação solo-prumo, mas sim o prumo por si só, foi admitido um encastramento na base de todos os prumos. Na Figura 7 encontram-se os resultados obtidos em termos de força resistente ($F_{\text{resistente}}$) para os prumos ensaiados.

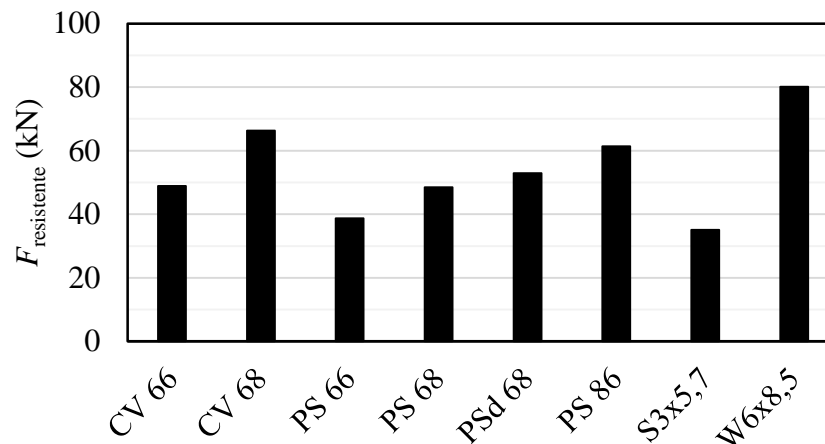


Figura 7 - Resultados em termos de força resistente dos prumos considerados no estudo realizado por Gatchell & Michie (1974)

Com este estudo os autores concluíram que, para guardas de segurança que utilizam prumos rígidos, os prumos CV68 e PS86 fornecem uma força resistente semelhante à do prumo de aço $W6 \times 8,5$. No caso de guardas de segurança realizadas com prumos flexíveis, os prumos PS 66 comportaram-se de forma idêntica à dos prumos de aço $S3 \times 5,7$ (Gatchell & Michie, 1974).

2.5.3 Calcote & Kimball (1978) - Estudo acerca do comportamento de prumos de madeira e aço em diferentes tipos de solo

Com o objetivo de estudar o comportamento de prumos de aço e madeira quando cravados em diferentes tipos de solo, Calcote & Kimball (1978) conduziram uma série de ensaios dinâmicos a prumos com recurso ao sistema de pêndulo gravitacional. Os prumos foram cravados em 5 tipos de fundações diferentes (i.e., num suporte rígido, num seixo, numa areia argilosa, numa argila e numa argila saturada).

Na Figura 8, encontram-se os resultados obtidos pelos autores relativamente à força resistente ($F_{\text{resistente}}$) obtida através da realização dos ensaios.

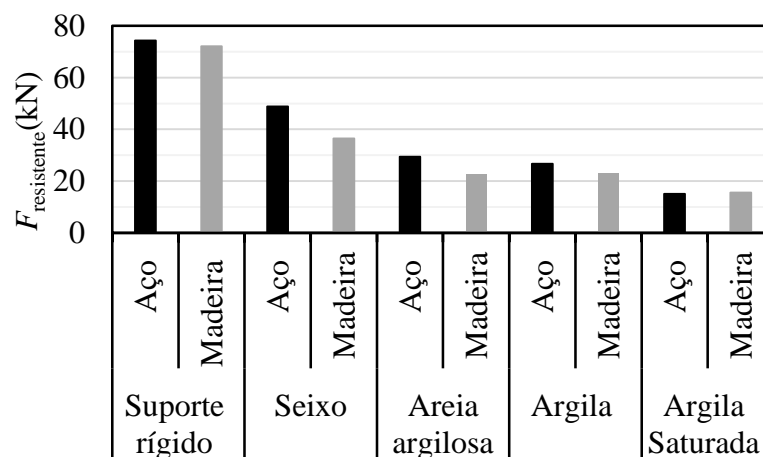


Figura 8 - Resultados obtidos por Calcote & Kimball (1978) relativos à força resistente do sistema solo-prumo

Na Figura 9 encontram-se os resultados em termos de deslocamento final (d) do prumo após a realização dos ensaios dinâmicos.

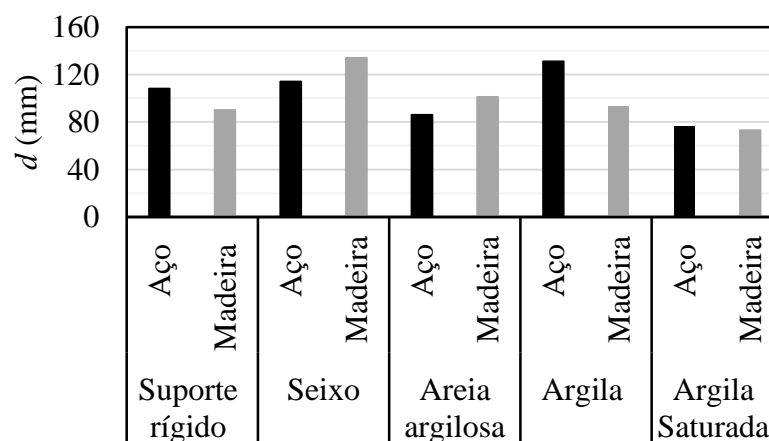


Figura 9 - Resultados obtidos por Calcote & Kimball (1978) em termos de deslocamento final do prumo no final dos ensaios

Da realização deste estudo, os autores concluíram que utilizando solos com melhores características de resistência aumentava-se a capacidade resistente do sistema solo-prumo. Em termos de deslocamento final do prumo, Calcote & Kimball (1978) verificaram que estes foram semelhantes, com exceção dos prumos cravados na argila saturada, que apresentaram deslocamentos ligeiramente inferiores aos restantes. Os autores concluíram também que existiu uniformidade em termos de forças e deslocamentos entre prumos de aço e madeira cravados em cada solo considerado.

2.5.4 Eggers *et al.* (1984) - Estudo sobre prumos instalados num maciço rochoso

Muitas vezes, quando se colocam guardas de segurança ao longo da AAFR, a fundação onde estas são instaladas vai mudando à medida que se vai avançando na colocação da guarda, podendo mesmo surgir a necessidade de a instalar sobre um maciço rochoso. Nesse caso, não é possível recorrer-se ao método de cravação dos prumos para a sua instalação, sendo necessário adotar outro tipo de solução. Uma dessas soluções consiste na perfuração do maciço e posterior preenchimento do buraco resultante com um material (e.g., solo ou betão) e por último é realizada a cravação dos prumos no mesmo.

Eggers *et al.* (1984), com o objetivo de estudarem qual o melhor material de preenchimento a utilizar nestas situações, conduziram uma série de ensaios estáticos a prumos de madeira. Para isso, consideraram dois tipos de material de preenchimento, betão e solo, sendo que no caso do solo foram considerados 3 tipos distintos (i.e., argila, areia e calcário deteriorado).

Realizaram-se ensaios de carga estática nos prumos, cravados a 460 mm de profundidade, para determinar a influência do material utilizado como preenchimento no comportamento do sistema e saber-se qual o material de preenchimento que iria desenvolver a força resistente ($F_{\text{resistente}}$) requerida para que os prumos tivessem um desempenho satisfatório.

Para a realização deste estudo, os autores começaram por executar 4 ensaios de carregamento estático, a uma velocidade constante, a prumos de madeira fixados num maciço rochoso simulado através de um bloco de betão armado, tal como se pode observar nas Figuras 10a e 10b. Os prumos foram posteriormente cravados a 460 mm nos materiais de preenchimento já referidos. Seguidamente compararam os resultados destes ensaios com outros anteriormente realizados em prumos cravados diretamente em dois tipos de solo (i.e., argila e areia) a 1000 mm.

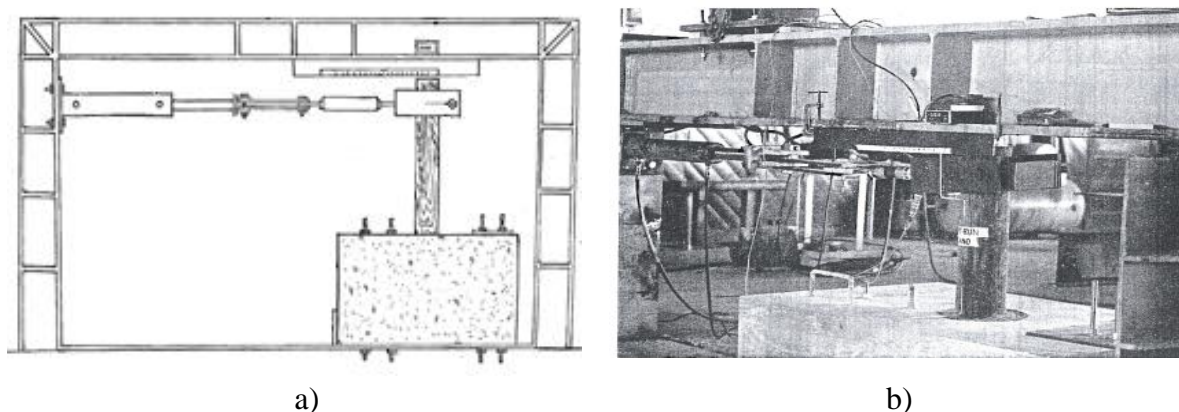


Figura 10 - a) Representação esquemática do sistema de carregamento estático utilizado; b) Registo fotográfico do sistema de carregamento estático (Eggers *et al.*, 1984)

Os resultados dos ensaios estáticos realizados encontram-se apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios estáticos realizados por Eggers *et al.* (1984)

| Tipos de terreno | Tipo de material de preenchimento | b (mm) | $F_{\text{resistente}}$ (kN) |
|-------------------------|--|----------------------------|--|
| Rocha | Argila | 460 | 50,62 |
| | Areia | | 37,50 |
| | Calcário deteriorado | | 37,54 |
| | Betão | | 41,81 |
| Solo | Argila | 1000 | 16,46 |
| | Areia | | 14,23 |

Dos resultados obtidos a partir da realização dos ensaios estáticos, os autores verificaram que, relativamente aos prumos cravados no maciço rochoso, em diferentes tipos de material de preenchimento (i.e., betão e solo), apresentaram relativamente próximos. Comparando os resultados obtidos para os prumos ensaiados no maciço rochoso, com os ensaiados em solo, os autores verificaram que, a força resistente dos prumos ensaiados em rocha foi muito superior à dos ensaiados em solo, mesmo tendo estes últimos um maior comprimento de cravação (b). Esta diferença, foi justificada, pelo fato de o modo de rotura dos prumos instalados no maciço rochoso ocorrer pelo prumo ao invés de existir rotura pelo solo, como aconteceu nos prumos cravados no solo.

2.5.5 Coon *et al.* (1999) - Estudo realizado para a determinação das propriedades dinâmicas da interação solo-prumo

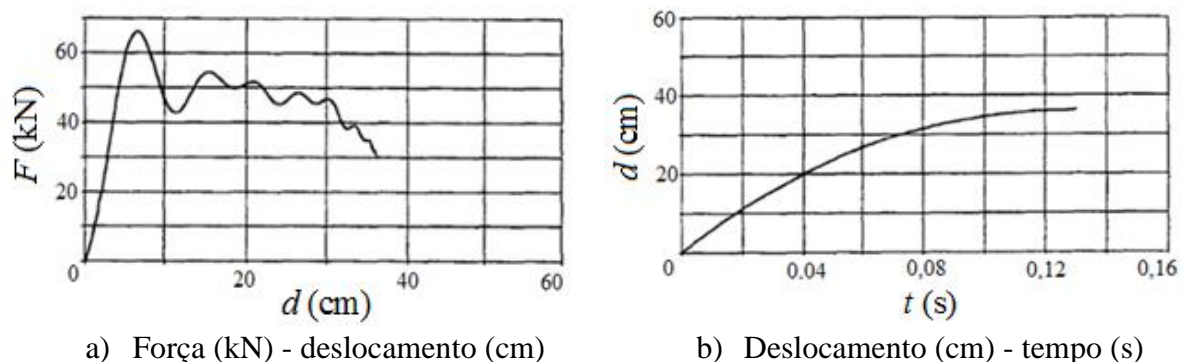
Coon *et al.* (1999) realizaram uma série de ensaios de impacto dinâmicos em prumos de aço e madeira cravados num solo, com o objetivo de determinar as propriedades dinâmicas da interação solo-prumo.

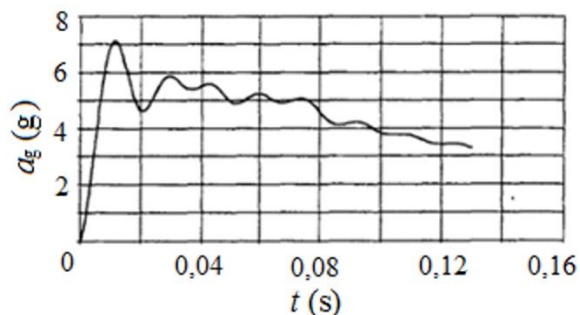
Os prumos de aço ensaiados foram do tipo W15 × 13,5 e W150 × 23,5, e os de madeira de seção transversal (s) 150 × 200 mm². Para a realização destes ensaios, os autores recorreram à utilização de um veículo ‘*bogie*’ de 950 kg de massa e ensaiaram os prumos a 3 velocidades distintas (i.e., 20 km/h, 32 km/h e 49 km/h).

Os aparelhos utilizados na recolha de dados foram uma célula de carga, para poderem registar as forças e uma câmara fotográfica de alta velocidade. Instalaram também um acelerómetro no centro de gravidade do veículo para registar as acelerações deste ao longo do ensaio.

Os prumos foram ensaiados a 550 mm acima da linha da superfície do solo. Além disso, foi utilizado neoprene na frente do veículo ‘*bogie*’ para minimizar as concentrações de tensões geradas pelas forças de atrito que atuam ao longo da superfície do prumo. Todos os prumos foram cravados no mesmo tipo de solo de acordo com as especificações definidas em NCHRP (1993).

Na Figura 11 encontram-se os resultados obtidos da realização do quarto ensaio dinâmico a um prumo do tipo W150 × 13,5 para uma velocidade de 20 km/h.





c) Aceleração (g's) - tempo (s)

Figura 11 - Ensaio dinâmico realizado a uma velocidade de 20 km/h (adaptado de Coon *et al.*, 1999)

Os resultados dos ensaios realizados por estes autores encontram-se resumidos na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios dinâmicos realizados com o veículo ‘*bogie*’ (adaptado de Coon *et al.*, 1999)

| Tipo de prumo | v_{impacto} (km/h) | $F_{\text{máx}}$ (kN) | $E_{\text{absorvida}}$ (J) | d (mm) | Veículo ‘ <i>bogie</i> ’ |
|---------------|-----------------------------|-----------------------|----------------------------|----------|--------------------------|
| Aço | | | | | |
| W150 × 13,5 | ≈ 20 | 64 | 10,2 | 234 | Parou |
| | ≈ 20 | 32,3 | 14,1 | 597 | |
| | ≈ 20 | 66,9 | 14,2 | 314 | |
| | ≈ 20 | 67 | 15,8 | 348 | |
| W150 × 23,5 | ≈ 32 | 104,7 | 28,9 | 597 | Ultrapassou |
| | ≈ 32 | 86,3 | 23,4 | 597 | |
| Madeira | | | | | |
| 150 × 200 | ≈ 20 | 36,3 | 11,2 | 444 | Parou |
| | ≈ 20 | 38,8 | 10,3 | 450 | |
| | ≈ 32 | 77,8 | 27,1 | 597 | |
| | ≈ 32 | 64,2 | 5,4 | 145 | |

Relativamente aos prumos de aço, os autores concluíram que o primeiro modo de rotura ocorreu pelo solo. Foram verificadas diferenças no comportamento do solo quando se realizaram os ensaios com 20 km/h e 32 km/h, pois a velocidades mais altas verificaram o aumento do pico da força e da energia absorvida pelo sistema.

Relativamente aos prumos de madeira, o modo de rotura pelo solo apenas ocorreu para a velocidade mais baixa considerada (i.e., 20 km/h). Para velocidades superiores o primeiro modo de rotura deu-se pelo prumo.

2.6 Modelação em elementos finitos da interação entre o prumo e o solo

O crescente desenvolvimento dos computadores conjuntamente com a consideração dos métodos de discretização permitem, hoje em dia, analisar o comportamento de estruturas sujeitas aos mais variados tipos de solicitações, como por exemplo, o caso de uma guarda de segurança ou prumo sujeito a uma colisão.

Devido ao avultado custo associado à realização de ensaios de colisão à escala real (Jiga *et al.*, 2013) e à inviabilidade de se poderem controlar todas as condições de ensaio, tornou-se de grande interesse aplicar estes métodos de discretização para simular impactos de veículos em guardas de segurança, permitindo obter resultados próximos da realidade (Gulbenkian, 2011).

São vários os métodos de discretização possíveis de considerar, sendo os mais conhecidos, o método dos elementos finitos (MEF), o método dos volumes finitos e (MVF) e o método das diferenças finitas (MDF) (Silva, 2011).

O método de elementos finitos (MEF) é uma aproximação numérica através da qual as equações diferenciais gerais podem ser resolvidas de uma forma aproximada (Lima, 2006). Este método consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo os mesmos, as características e propriedades do meio original (Lotti *et al.*, 2006). Os modelos de elementos finitos podem ser calibrados e validados através da comparação dos resultados obtidos nestes com os obtidos em ensaios dinâmicos (Bligh *et al.*, 2004).

No caso particular da avaliação do desempenho do sistema solo-prumo existem alguns estudos elaborados por diferentes autores que realizam modelos computacionais, os quais são posteriormente validados através de ensaios de colisão. Seguidamente apresentam-se dois estudos considerados relevantes.

2.6.1 Wu & Thomson (2007) - Estudo acerca da interação entre solo e prumo

Com o objetivo de se obter a resposta em termos de força em função do deslocamento ($F-d$) de um prumo cravado num seixo, Wu & Thomson (2007) realizaram ensaios quase-estáticos e dinâmicos e, posteriormente utilizaram os dados obtidos nestes para validar um modelo computacional, utilizando o *software* de análise de elementos finitos LS-DYNA.

Com esse modelo, os autores, realizaram um estudo paramétrico para investigar a influência da rigidez do solo (K) na interação solo-prumo. Neste estudo foram considerados prumos de aço com uma seção transversal (s) $100 \times 55 \text{ mm}^2$, comprimento total (h) de 1700 mm e profundidade de cravação (b) de 1000 mm. O solo considerado no local de ensaio encontrava-se de acordo com os requisitos apresentados em NCHRP (1993).

Na realização do ensaio quase-estático, os autores utilizaram um veículo de reboque ao qual foi anexado um cabo que permitiu exercer uma força a uma velocidade constante. Em série com o cabo foi instalada uma célula de carga que permitiu a leitura da força. Para além desta, utilizaram também um sensor de posição para se poderem registar os deslocamentos do sistema.

Na Figura 12, encontram-se os resultados em termos de força em função do deslocamento dos 4 ensaios quase-estáticos realizados, bem como da curva da média e desvio padrão dos resultados obtidos.

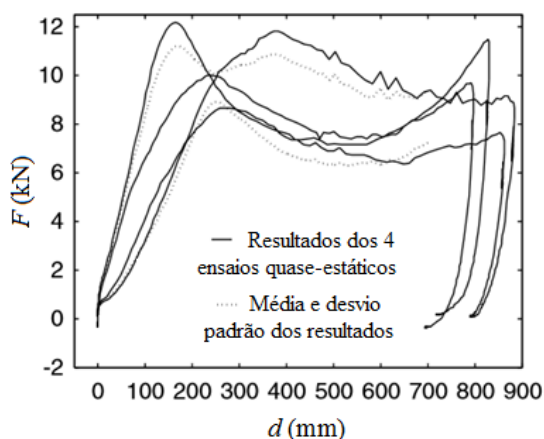


Figura 12 - Resultado em termos de $F - d$ dos ensaios quase-estáticos realizados por Wu & Thomson (2007)

Através da análise dos resultados, os autores verificaram que os prumos começaram a inclinar para uma carga de 1 kN. Em seguida a carga aumentou linearmente com o deslocamento até atingir um valor máximo de 8,7 kN a 12,2 kN, para um deslocamento correspondente de 160 mm a 350 mm. Depois de atingir o valor máximo, a força diminuiu significativamente com o deslocamento.

Nos ensaios dinâmicos foi utilizado um veículo ‘*bogie*’, que em conjunto com os dispositivos de medição apresentava uma massa de 1030 kg. A velocidade considerada no ensaio foi de $18 \pm 0,5$ km/h e foram ensaiados 3 prumos. Na Figura 13, encontra-se uma representação esquemática do ensaio dinâmico realizado pelos autores.

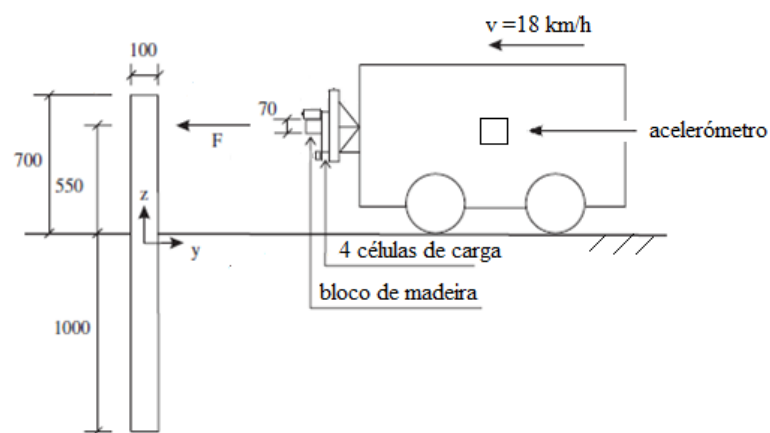


Figura 13 - Representação esquemática do sistema de ensaio utilizado na realização de ensaios dinâmicos com recurso a um veículo ‘*bogie*’ (adaptado de Wu & Thomson, 2007)

Na frente do veículo foram instaladas 4 células de carga, em que a soma da força medida em cada uma representava a força impacto entre o prumo e o veículo. Um acelerômetro foi colocado perto do centro de gravidade do veículo, e com base nos dados deste, os autores conseguiram determinar a velocidade e conseqüentemente o deslocamento. Na Figura 14, encontram-se os resultados em termos de $F-d$ dos ensaios dinâmicos realizados por estes autores.

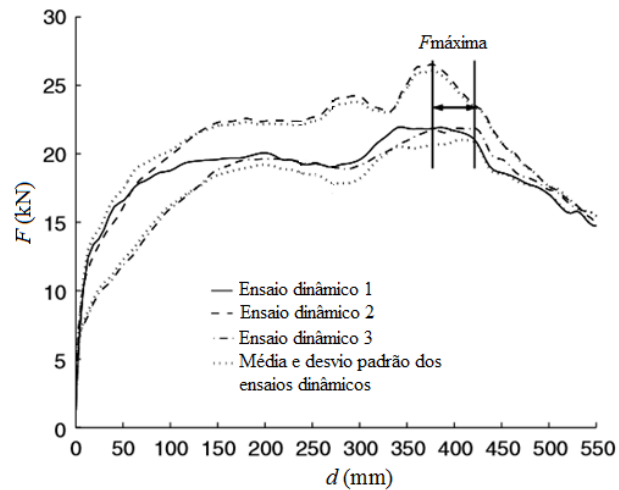


Figura 14 - Resultado em termos de $F - d$ dos ensaios dinâmicos realizados por Wu & Thomson (2007)

Com a realização dos ensaios dinâmicos, os autores verificaram que a força máxima registada variava entre 18,9 a 22,4 kN.

Relativamente ao modelo definido para simular o prumo cravado no seixo, foi utilizado um cilindro com um diâmetro de 4 metros para simular o solo, no qual um único prumo foi cravado a uma profundidade de penetração de 1 metro. O modelo do solo consistiu em 70150 elementos quadrangulares de oito nós. O modelo do prumo de aço era composto por 5148 elementos de casca de quatro nós e consideraram o comportamento elástico-linear do material. Na Figura 15, encontra-se o modelo dinâmico de elementos finitos utilizado pelos autores.

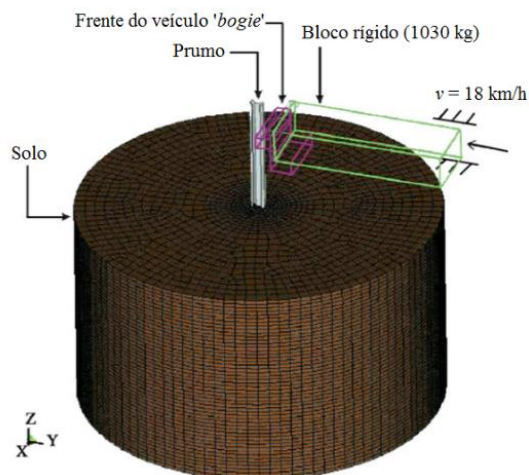


Figura 15 - Modelo dinâmico de elementos finitos realizado por Wu & Thomson (2007)

Depois de realizado o modelo computacional, os autores avaliaram a influência da rigidez do seixo na interação do sistema solo-prumo. Para tal, realizaram um estudo paramétrico adotando 5 módulos de rigidez (K) diferentes, de acordo com os valores típicos do solo em estudo. Os resultados obtidos através da realização do estudo paramétrico foram comparados com os obtidos nos ensaios dinâmicos de campo e estes estão apresentados na Figura 16.

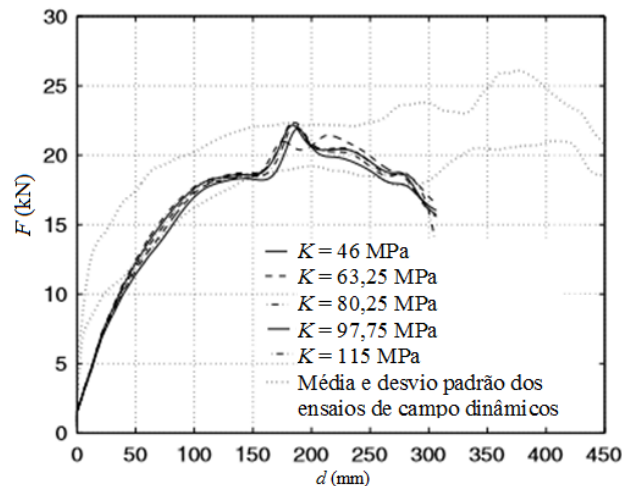


Figura 16 - Curvas $F-d$ obtidas a partir do estudo paramétrico e dos ensaios dinâmicos realizados por Wu & Thomson (2007)

Com este estudo os autores concluíram que fazendo variar o módulo de rigidez do solo de 46 MPa a 115 MPa, as curvas de força em função do deslocamento ($F - d$) foram semelhantes. Para além disso, após a realização do estudo, os autores verificaram que os resultados dos ensaios de campo, quer estáticos quer dinâmicos, mostravam algumas diferenças em termos de força registada, que provavelmente seria devido ao grau de compactação do seixo em redor do prumo não ser exatamente o mesmo de ensaio para ensaio, uma vez que, o buraco aberto para instalar o prumo era depois preenchido e em seguida compactado manualmente. Os autores verificaram ainda que, a resistência dinâmica medida foi cerca de duas vezes superior à resistência quase-estática.

2.6.2 Nauman *et al.* (2010) - Desenvolvimento de um modelo de elementos finitos (MEF) e posterior validação experimental da interação solo-prumo

Com o objetivo de desenvolver um modelo de elementos finitos (MEF) para se obter o comportamento da interação solo-prumo, Nauman *et al.* (2010) começaram por realizar ensaios

de colisão recorrendo ao sistema de pêndulo para determinar a resposta real da interação solo-prumo em ensaios dinâmicos com diferentes profundidades de cravação (b). Os resultados obtidos destes ensaios serviram para validar o modelo de elementos finitos posteriormente realizado. Para isso, os autores realizaram uma análise de simulação coincidente com a resposta observada nos ensaios, recorrendo ao *software* LS-DYNA.

Relativamente aos ensaios dinâmicos realizados, consideraram prumos de aço ($W6 \times 8$) com diferentes profundidades de cravação (i.e., 800 mm, 900 mm, 1000 mm e 1100 mm) num solo constituído por calcário deteriorado, com um grau de compactação definido previamente. Por forma a se obterem dados mais realistas foram realizados 2 ensaios por cada profundidade considerada. A massa e a velocidade de impacto consideradas na realização dos ensaios foram de 840 kg e 35,41 km/h, respetivamente.

Os prumos foram colididos por um pêndulo e foi medida no corpo desse a resposta em termos de aceleração em função do tempo ($a_g - t$). A massa do pêndulo foi suspensa por cabos e o seu lado de embate era composto por várias placas de alumínio configuradas para simular a parte frontal de um veículo, conforme se verifica na Figura 17.

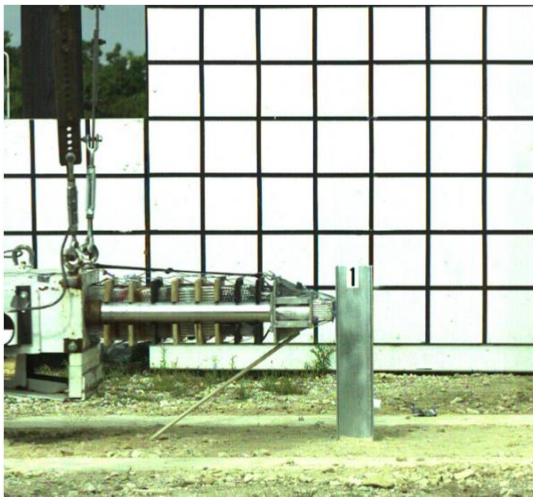


Figura 17 - Registo fotográfico do ensaio dinâmico de pêndulo realizado por Nauman *et al.* (2010)

A resposta obtida para um dos prumos cravados a 1100 mm de profundidade em termos de aceleração em função do tempo encontra-se na Figura 18.

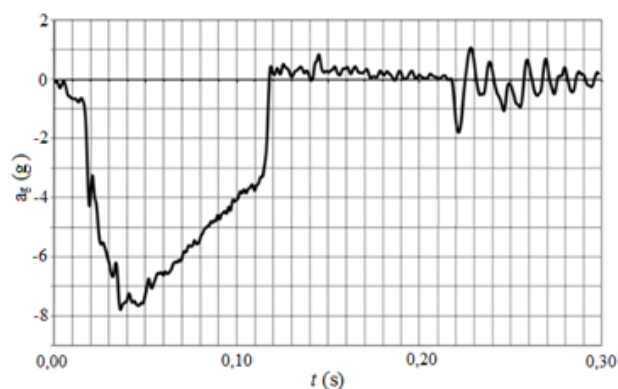


Figura 18 - Resposta em termos $a_g - t$ para um prumo cravado a 1100 mm de profundidade (Nauman *et al.*, 2010)

Relativamente ao modelo de elementos finitos realizado, os autores começaram por modelar o sistema de pêndulo utilizando elementos de mola. Quanto ao prumo, este foi modelado utilizando elementos de casca assumindo um comportamento do material elasto-plástico. Já o solo foi modelado utilizando elementos sólidos hexagonais formando uma geometria retangular, considerando dois tipos materiais existentes no próprio programa (i.e., ‘*Geological Cap*’ e ‘*Jointed Rock*’). Na Figura 19 é possível visualizar o modelo de elementos finitos elaborados pelos autores deste estudo.

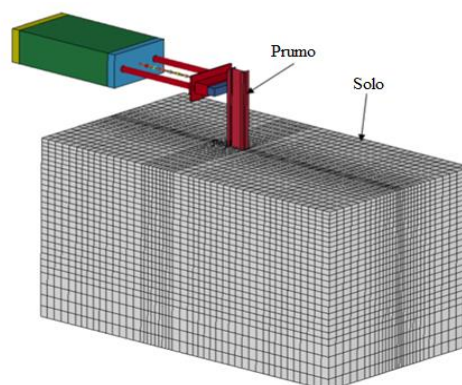


Figura 19 - Modelo de elementos finitos realizado por Nauman *et al.* (2010)

Quando os autores analisaram o modelo considerando o solo ‘*Geological Cap*’, conseguiram validar o mesmo para uma profundidade de cravação do prumo no solo de 1100 mm. No entanto, quando se realizaram simulações considerando menores profundidades de cravação no solo, os autores observaram que o comportamento do material começou a desviar-se da resposta observada nos ensaios.

Os investigadores avaliaram depois o uso do material '*Jointed Rock*' disponível no programa LS-DYNA para representar o solo. Vários parâmetros do modelo foram parametricamente variados num extenso exercício de calibração, utilizando o modelo com o prumo cravado a 800 mm de profundidade. Uma vez calibrado o modelo, analisaram-se as outras profundidades consideradas no estudo, e com isso, os autores verificaram que se obtiveram resultados suficientemente razoáveis, principalmente em termos da resposta aceleração-tempo, que foi praticamente coincidente entre a simulação numérica e a obtida nos ensaios realizados com as diferentes profundidades consideradas.

Com a realização deste estudo os autores concluíram que o modelo realizado utilizando o material '*Jointed Rock*' seria mais adequado para modelar o comportamento do solo nos casos em que o prumo tenha uma profundidade de cravação no mesmo reduzida.

3. CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS E PRUMOS

Neste capítulo pretende-se realizar a descrição e caracterização dos materiais considerados neste estudo (i.e., dos solos e dos prumos). Relativamente aos solos considerados, começa-se por mostrar a localização onde foram recolhidas as amostras. Seguidamente, são descritos os ensaios de caracterização física (i.e., determinação do teor em matéria orgânica, determinação do teor em água, determinação do peso volúmico do solo, análise granulométrica e determinação dos limites de consistência) e mecânica (i.e., ensaio de corte direto e ensaio triaxial), realizados a estes. Por fim, são apresentados e analisados os resultados obtidos laboratorialmente. Ainda neste capítulo, é apresentada a geometria e as propriedades mecânicas dos prumos utilizados no estudo.

3.1 Recolha das amostras de solo

Para se avaliar a influência do tipo de solo no desempenho do sistema solo-prumo, decidiu-se realizar uma série de ensaios de colisão considerando dois solos com propriedades distintas. Foram então selecionados dois solos, um orgânico e um residual inorgânico, ambos localizados nas proximidades do Centro para Valorização de Resíduos (CVR), junto das imediações do Campus de Azurém da Universidade do Minho (UM), como se pode observar na Figura 20.



Figura 20 - Localização do solo orgânico (poço 1) e do solo residual inorgânico (poço 2), considerados na realização do estudo

O critério para a sua escolha susteve-se no interesse em estudar um solo de baixa resistência, por vezes existente nos locais onde são instaladas as guardas de segurança (i.e., solo orgânico) e um solo de boa resistência, desejável para a fundação de uma via de comunicação (i.e., solo residual inorgânico).

Para a recolha das amostras foram abertos dois poços (i.e., poço 1 e poço 2) com recurso a uma retroescavadora. Relativamente ao poço 1, constituído por solo orgânico, foram recolhidas a uma profundidade de 1,10 m, 3 amostras intactas (I₁₁, I₁₂ e I₁₃) (Figura 21a), e uma amostra de solo remexido (R₁) (Figura 21b). Quanto ao poço 2, constituído por solo residual inorgânico, foi recolhida uma amostra intacta a 1,10 m de profundidade (I₂₁) (Figura 22a) e, a essa mesma profundidade, foi retirada uma amostra de solo remexido (R₂₁) (Figura 22b). Ainda neste poço, mas a uma profundidade mais próxima da superfície do solo (i.e., a 0,40 m), recolhereu-se uma amostra intacta (I₂₂) (Figura 22c) e uma amostra de solo remexido (R₂₂) (Figura 22d), pois aquando a abertura deste poço verificou-se a existência de um estrato superficial de características distintas do solo recolhido à profundidade de 1,10 metros.

Na Tabela 12, encontram-se sintetizadas as informações relativas às amostras recolhidas.

Tabela 12 - Amostras recolhidas para a realização da caracterização física e mecânica dos solos considerados no estudo

| Poço | Tipo de solo | Qualidade da amostra | Designação | Profundidade (m) |
|------|---------------------|----------------------|-----------------|------------------|
| 1 | Orgânico | Intacta | I ₁₁ | 1,10 |
| | | | I ₁₂ | |
| | | | I ₁₃ | |
| | | Remexida | R ₁ | |
| 2 | Residual inorgânico | Intacta | I ₂₁ | 1,10 |
| | | | I ₂₂ | 0,40 |
| | | Remexida | R ₂₁ | 1,10 |
| | | | R ₂₂ | 0,40 |

Na Figura 21 e 22, é possível visualizar-se o procedimento executado para a obtenção das amostras *in situ*.



a) Amostras intactas
(1,10 m)

b) Amostra remexida
(1,10 m)

Figura 21 - Amostras recolhidas no poço 1 (Solo orgânico)



a) Amostra intacta
(1,10 m)

b) Amostra remexida
(1,10 m)

c) Amostra intacta
(0,40 m)

d) Amostra remexida
(0,40 m)

Figura 22 - Amostras recolhidas no poço 2 (Solo residual inorgânico)

3.2 Caracterização física dos solos

Considerando apenas as amostras remexidas recolhidas (i.e., R_1 , R_{21} e R_{22}), procedeu-se à caracterização física dos solos em estudo, realizando-se os seguintes ensaios:

- a) Determinação do teor em matéria orgânica;
- b) Determinação do teor em água;
- c) Determinação do peso volúmico;
- d) Análise granulométrica;
- e) Limites de consistência.

Na Tabela 13 encontram-se resumidos os ensaios realizados a cada amostra.

Tabela 13 - Ensaio de caracterização física realizados nos solos utilizados no estudo

| Poço | Amostra | Teor em matéria orgânica | Teor em água | Peso volúmico | Granulometria | Limites de consistência |
|------|-----------------|--------------------------|--------------|---------------|---------------|-------------------------|
| 1 | R ₁ | × | × | × | × | × |
| 2 | R ₂₁ | | × | | × | × |
| | R ₂₂ | | × | × | × | × |

Determinação do teor em matéria orgânica

Tendo em consideração que um dos solos em estudo continha matéria orgânica (i.e., poço 1, amostra remexida R₁), determinou-se o teor em matéria orgânica do mesmo, através da especificação LNEC (1967). Com esta determinação, concluiu-se que o teor em matéria orgânica seria de 5,20%. Realizou-se primeiramente este ensaio, pois a realização dos ensaios posteriores poderia queimar a matéria orgânica existente neste solo, diminuindo a massa real do solo seco.

Determinação do teor em água

Para a determinação do teor em água (ω) *in situ* de cada um dos solos, recorreu-se a um dos métodos correntemente utilizados em laboratório, o método da estufa (Figura 23). Para a realização deste método seguiu-se o especificado na Norma Portuguesa IGPAI (1965).

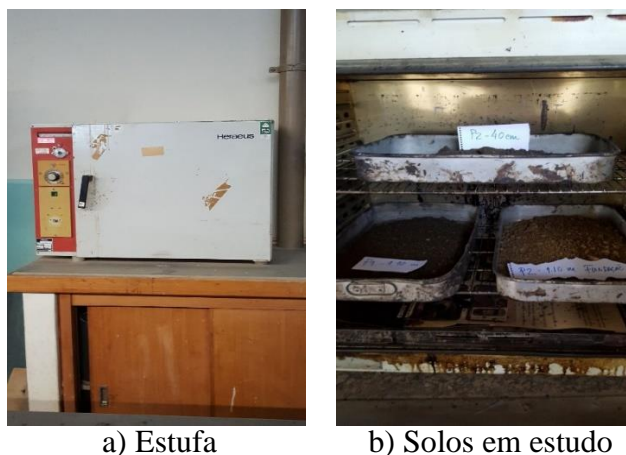


Figura 23 - Método utilizado para a determinação do teor em água (ω)

Da realização deste método obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Teor em água *in situ* dos solos em estudo

| Poço | Amostra | ω (%) |
|------|-----------------|--------------|
| 1 | R ₁ | 18,53 |
| 2 | R ₂₁ | 7,05 |
| | R ₂₂ | 14,91 |

De notar que o teor em água da amostra R₂₂ é superior ao da amostra R₂₁, mesmo tendo sido estas recolhidas no mesmo poço. Tal pode ser justificado pela ocorrência de precipitação nos dias anteriores ao da recolha dos solos, que levou a que o solo superficial possuísse maior quantidade de água.

Determinação do peso volúmico

Para se determinar o peso volúmico dos solos em análise, recorreu-se aos procedimentos realizados no LEST-UMinho, tendo-se obtido para o solo orgânico um peso volúmico $\gamma = 16,97$ kN/m³ e um peso volúmico seco $\gamma_d = 14,09$ kN/m³. Quanto ao solo residual inorgânico obteve-se um peso volúmico $\gamma = 18,74$ kN/m³ e um peso volúmico seco $\gamma_d = 16,02$ kN/m³.

Análise Granulométrica

Posteriormente, realizou-se a análise granulométrica, das 3 amostras (i.e., R₁, R₂₁ e R₂₂). Para tal, seguiu-se a especificação LNEC (1966a) para a sua execução, preparando-se as amostras por via seca, de acordo com especificação LNEC (1966b), tendo-se obtido os resultados da Figura 24.

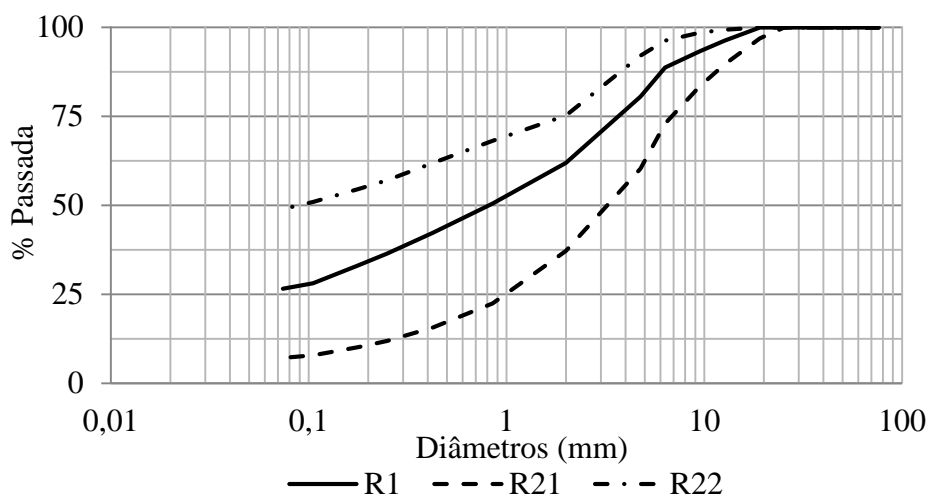


Figura 24 - Curvas granulométricas obtidas para os solos utilizados no estudo

Determinação dos limites de consistência

O último ensaio realizado em laboratório para se caracterizar fisicamente os solos em estudo foi o da determinação dos limites de consistência (i.e., limite de liquidez (ω_l) e limite de plasticidade (ω_p)), recorrendo-se à IGPAI (1969). Com a sua realização verificou-se que os 3 solos eram não plásticos (NP).

Com a realização da análise granulométrica e dos limites de consistência foi possível proceder-se à classificação dos solos em estudo, recorrendo-se à classificação unificada revista ASTM (2011).

Na Tabela 15, encontram-se os resultados obtidos por este sistema de classificação de solos.

Tabela 15 - Resultados da classificação dos solos segundo a classificação unificada revista (ASTM)

| Poço | Classificação ASTM | Profundidade (m) |
|------|--|------------------|
| 1 | SM - Areia siltosa com seixo e finos orgânicos | 1,10 |
| 2 | SM - Areia siltosa | 0,40 |
| | SW-SM - Areia bem graduada com silte | 1,10 |

3.3 Caracterização mecânica dos solos

Considerando agora as amostras intactas recolhidas (Tabela 12), procedeu-se à caracterização mecânica dos solos, com o objetivo de se obterem os seus parâmetros de resistência, (i.e., o ângulo de atrito (Φ) e a coesão (c)) e o parâmetro de deformabilidade (i.e., o módulo de deformabilidade secante (E_{sec})). Para isso, realizaram-se ensaios de corte direto e triaxiais. Na Tabela 16 encontram-se resumidos os ensaios realizados a cada amostra intacta.

Tabela 16 - Ensaios de caracterização mecânica realizados nos solos utilizados no estudo

| Poço | Amostra | Ensaio de corte direto | | Ensaio triaxial |
|------|-----------------|------------------------|----------|-----------------|
| | | n/saturado | saturado | |
| 1 | I ₁₁ | × | | |
| | I ₁₂ | | × | |
| | I ₁₃ | | | × |
| 2 | I ₂₁ | | | × |
| | I ₂₂ | | × | |

Relativamente ao solo do poço 1, com as 3 amostras recolhidas a 1,10 m de profundidade, realizaram-se dois ensaios de corte direto e um ensaio triaxial. No entanto, com as amostras recolhidas no poço 2 apenas foi possível realizar um ensaio por cada solo, uma vez que apenas se recolheu uma amostra por cada estrato existente nesse poço, devido à grande dificuldade na cravação do amostrador nestes.

3.3.1 Ensaio de corte direto

Preparação dos provetes

Na preparação dos provetes deste ensaio, começou-se por retirar da câmara húmida a amostra intacta e seguidamente cravou-se o anel (Figura 25a), com um diâmetro de 60,83 mm e volume (V) de 87,10 cm³, diretamente na amostra. Com recurso a uma alavanca hidráulica (Figura 25b), retirou-se o anel cravado (Figura 25c) e regularizou-se a sua superfície. Parte do solo restante foi utilizado para determinação do teor em água.

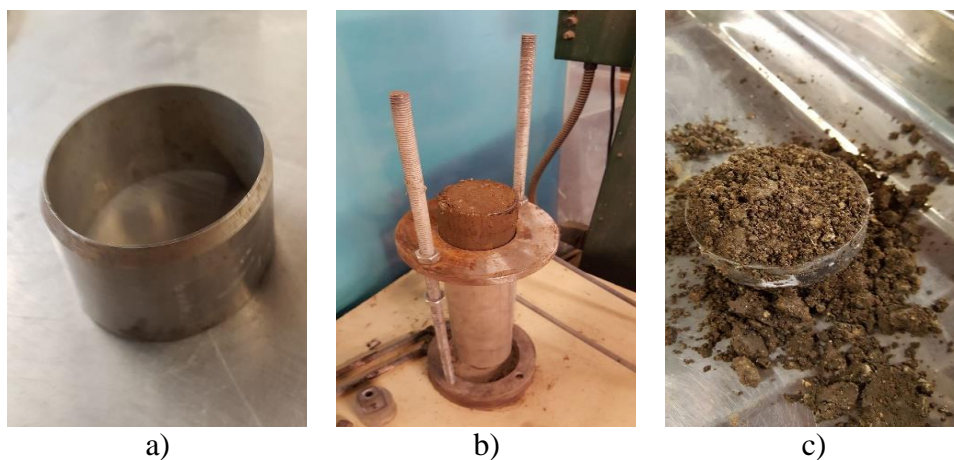


Figura 25 - Procedimento para a preparação dos provetes a utilizar no ensaio de corte direto

Ensaio realizados

Realizaram-se 3 ensaios de corte direto multi-estágios, do tipo consolidado-drenado (Tabela 17). O ensaio realizado com a amostra I₁₁, foi executado sem a colocação de água na caixa de corte para se ter em conta a existência de sucção *in situ*, no entanto, não se conseguiu registar este parâmetro. Nas amostras I₁₂ e I₂₂, foi adicionada água, para se simular a baixa resistência do solo no final de um forte período de chuva.

Tabela 17 - Patamares de carga considerados na realização dos ensaios de corte direto

| Poço | Amostra | ω (%) | Patamares de carga de consolidação (kPa) | |
|------|-----------------|--------------|--|-----------|
| | | | n/saturado | saturado |
| 1 | I ₁₁ | 18,53 | 5 | → 25 → 50 |
| | I ₁₂ | | | |
| 2 | I ₂₂ | 14,91 | | |

Em cada ensaio multi-estágio, realizou-se uma fase de consolidação seguida de uma de corte. Por forma a simularem-se de forma tão aproximada quanto possível as condições de carregamento prevalentes no maciço do qual foram retiradas as amostras, foram definidos patamares de 5 kPa, 25 kPa e 50 kPa de tensão vertical (σ_v) para a realização do ensaio. Escolheram-se patamares de carga baixos porque os solos foram recolhidos a uma profundidade relativamente próxima da sua superfície.

A fase de corte foi efetuada através da imposição de uma translação horizontal a uma velocidade (v) de 0,085 mm/min. Estes valores encontram-se de acordo com o especificado na ASTM (1998), e são relativamente baixos para permitir saber com maior exatidão o momento de rotura do solo e para que ocorra a drenagem da amostra.

De notar que, devido à existência de agregados de dimensões consideráveis, que poderiam por em causa a realização do ensaio e com isso os resultados, optou-se por reconstituir a amostra I₂₂, limitando-se a ($D/10$) o tamanho máximo das partículas desse solo, conforme as recomendações da norma ASTM (1998). Sabendo-se que o diâmetro (D) da caixa de corte utilizada era de 60,83 mm, obteve-se uma dimensão máxima dos agregados de 6,08 mm. Por esse motivo utilizou-se o peneiro #4 ASTM (4,75 mm) e seguidamente fez-se a reconstituição do provete com o teor em água verificado antes deste processo.

Procedimento de ensaio

Estes ensaios foram realizados tendo em consideração a norma ASTM (1998). Começou-se por preparar o equipamento e o sistema de aquisição automática de dados, transferiu-se o solo do anel para a caixa de corte (Figura 26a). Seguidamente colocou-se a solicitação corresponde ao 1º patamar de carga (Figura 26b) e deu-se início à fase de consolidação da amostra. Aguardou-se o tempo suficiente para a dissipação do excesso de pressão intersticial resultante da aplicação da solicitação e deu-se início à fase de corte (Figura 26c). Procedeu-se de igual forma em todas as amostras a ensaiar e por cada solicitação.

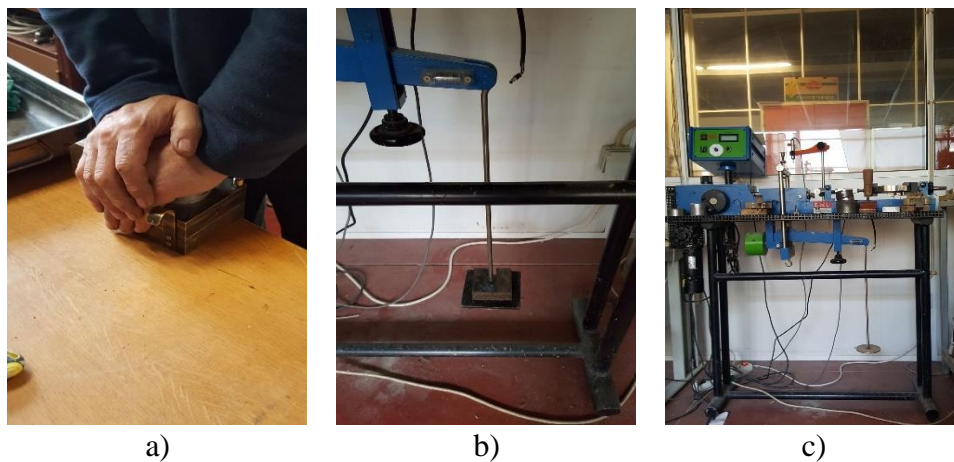


Figura 26 - Procedimento utilizado para a realização dos ensaios de corte direto

3.3.2 Ensaio triaxial

Uma vez que o ensaio de corte direto não permite obter parâmetros de deformabilidade, realizaram-se dois ensaios triaxiais por forma a obter-se o módulo de deformabilidade secante de cada solo. Para além disso, foi possível comparar os resultados obtidos com realização destes ensaios, com os obtidos na realização dos ensaios de corte direto, em termos de ângulo de atrito (Φ) e coesão (c).

Preparação dos provetes

Começou-se por retirar o solo do amostrador com recurso a um sistema alavancado hidráulico (Figura 27a). Seguidamente o solo foi colocado na base da câmara triaxial (i.e., no pedestal) e entre estes dois foi introduzida uma pedra porosa. O passo seguinte consistiu em proteger a

amostra com uma membrana impermeável (Figura 27b). No seu topo e em contacto com o solo colocou-se outra pedra porosa, e acima desta o bloco de topo. Por último foram colocados os O-rings (Figura 27c).

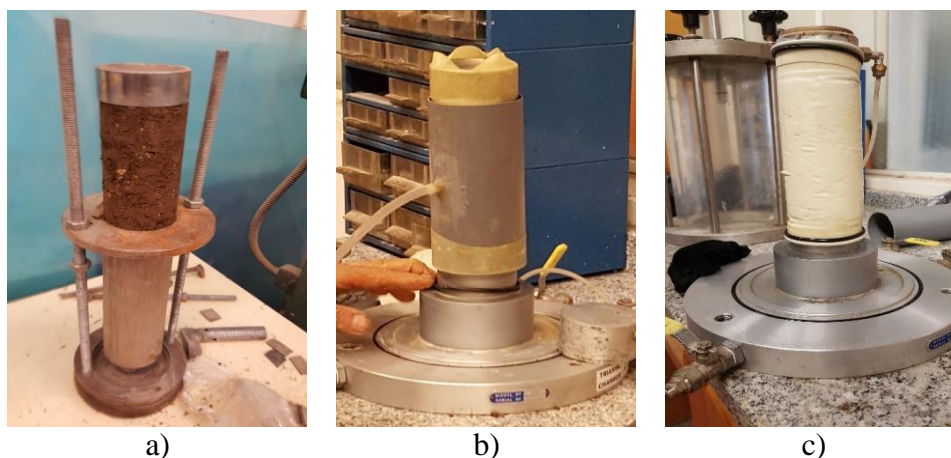


Figura 27 - Preparação dos provetes utilizados na realização de ensaios triaxiais

Ensaio realizados

Depois da montagem do provete, procedeu-se à consolidação das amostras, por forma a reestabelecer-se nestas o estado de tensão efetiva (σ') de repouso.

Realizaram-se dois ensaios triaxiais consolidados (Tabela 18), multi-estágios. Nenhum dos provetes foi saturado, estando apenas presente no provete o teor em água existente *in situ*, não tendo sido possível medir-se a sucção no decorrer do ensaio. Nestes, foram considerados os mesmos patamares de carga utilizados nos ensaios de corte direto realizados (i.e., 5 kPa, 25 kPa e 50 kPa).

Tabela 18 - Patamares de carga considerados na realização dos ensaios triaxiais

| Poço | Amostra | ω (%) | Patamares de carga de consolidação (kPa) |
|------|-----------------|--------------|--|
| 1 | I ₁₃ | 18,53 | 5 → 25 → 50 |
| 2 | I ₂₁ | 7,05 | |

Procedimento de ensaio

Os ensaios triaxiais foram realizados conforme os procedimentos do laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST-UMinho). Depois de preparado o provete e colocado

na câmara triaxial, instalou-se esta última numa prensa e iniciou-se o ensaio (Figura 28a). O fluido (i.e., ar) existente no interior da câmara foi estabelecido através da ligação a um compressor regulado por um manómetro (Figura 28b), por sua vez, o topo da amostra foi carregado com recurso a um êmbolo ligado à prensa, sendo medida a força (F) por ele aplicado através de uma célula de carga. A velocidade do ensaio foi de 0,10 mm/min, e a taxa de aquisição foi de uma amostra por cada 10 segundos.

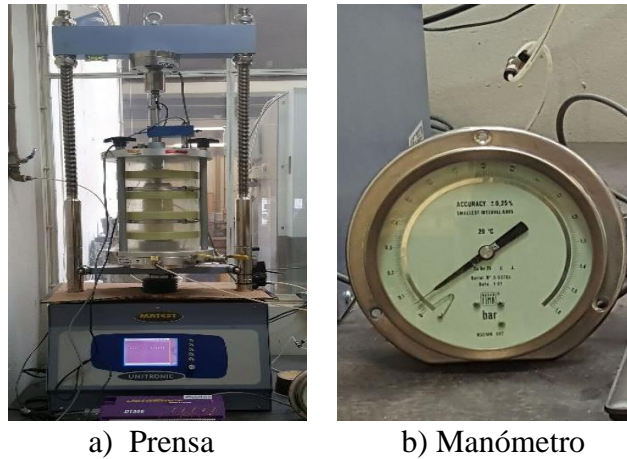


Figura 28 - Dispositivos utilizados na realização dos ensaios triaxiais

3.3.3 Apresentação e análise de resultados

Ensaio de corte direto

Com os resultados obtidos dos ensaios de corte foi possível traçar a curva de tensão tangencial em função do deslocamento horizontal ($\tau - \delta x$), por cada patamar de solicitação. Seguidamente, determinou-se a resistência residual de cada curva traçada e com esses valores foi possível representar a evolução da tensão de corte em função da tensão vertical aplicada ($\tau - \sigma_v$). Com esse gráfico, definiu-se uma linha de tendência e a respetiva equação, conseguindo-se obter os parâmetros de resistência de cada amostra ensaiada (i.e., ângulo de atrito e coesão).

Na Tabela 19, encontram-se os valores do teor em água de cada amostra ensaiada e os patamares de carga realmente considerados em cada ensaio.

Tabela 19 - Teor em água e patamares de consolidação utilizados nos ensaios de corte

| Poço | Amostra | ω (%) | Patamares de carga de consolidação (kPa) | |
|------|-----------------|--------------|--|----------|
| | | | n/saturado | saturado |
| 1 | I ₁₁ | 18,99 | 5,082 → 25,233 → 50,287 | |
| | I ₁₂ | 18,02 | | |
| 2 | I ₂₂ | 13,98 | | |

Os resultados obtidos do ensaio de corte direto realizado à amostra I₁₁ estão representados na Figura 29.

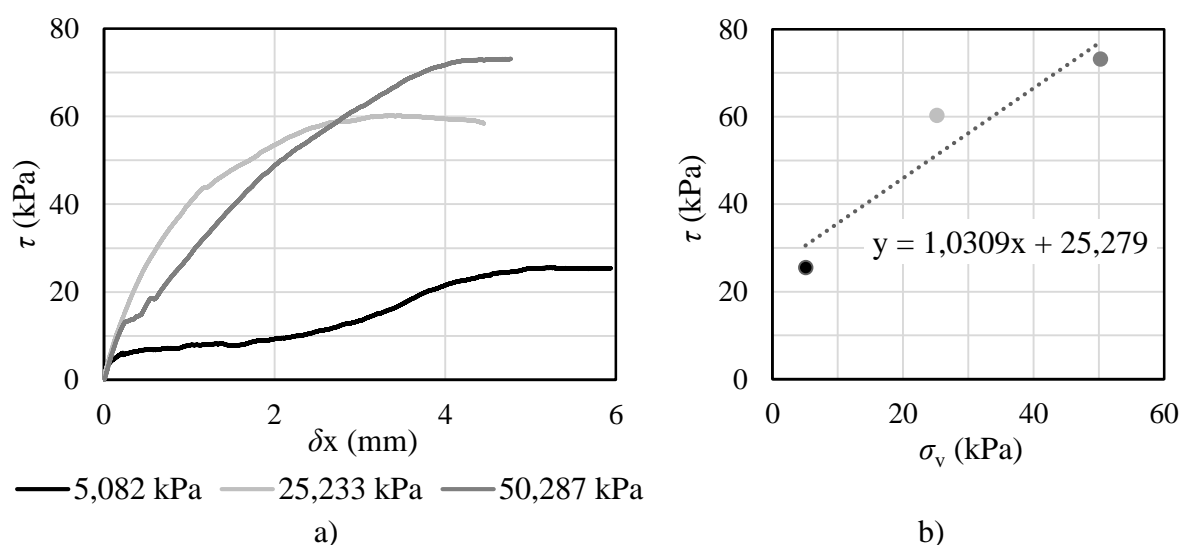


Figura 29 - a) Evolução da tensão de corte em função do deslocamento horizontal; b) Evolução da tensão de corte em função da tensão vertical aplicada (amostra I₁₁)

Analisando a Figura 29b verifica-se que não existiu linearidade entre os resultados obtidos, possivelmente devido à existência de agregados de dimensão considerável no interior do provete. Tal poderia ser contornado com a utilização de uma caixa de corte de maiores dimensões, mas, no entanto, este equipamento não se encontrava disponível no LEST-UMinho.

Com isto, concluiu-se que a amostra I₁₁, apresentou um ângulo de atrito $\Phi = 46^\circ$ e uma coesão $c = 25$ kPa (valores em tensões totais).

Relativamente aos resultados da amostra I₁₂, encontram-se na Figura 30.

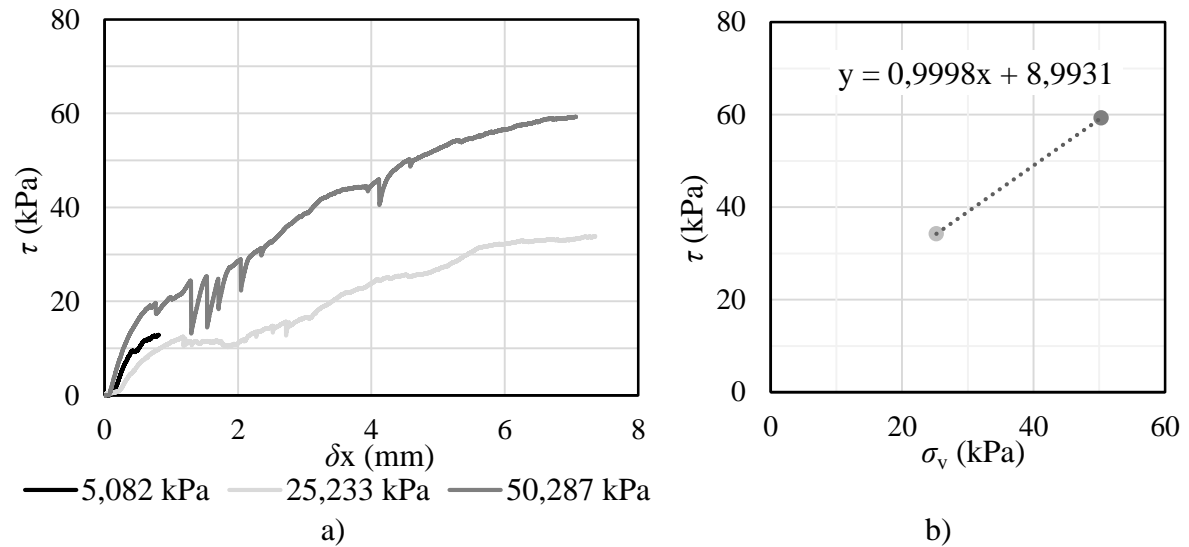


Figura 30 - a) Evolução da tensão de corte em função do deslocamento horizontal; b) Evolução da tensão de corte em função da tensão vertical aplicada (amostra I₁₂)

De notar que a curva de tensão tangencial em função do deslocamento horizontal ($\tau - \delta x$) do primeiro patamar de sollicitação não se encontra totalmente representada na Figura 30a, uma vez que, a partir de um determinado valor de deslocamento horizontal deu-se um acréscimo exacerbado da tensão tangencial, o que pode ser justificado pela existência de agregados de solo de dimensões consideráveis, que levaram à rotação do topo de carga da caixa de corte adulterando os resultados. Já no 2º e 3º patamares de sollicitação, correspondentes a 25,233 kPa e 50,287 kPa respetivamente, não se verificou a existência de um patamar devido novamente à rotação do topo de carga da caixa de corte, e por este motivo resolveu-se terminar cada ensaio, pois os valores que se iriam obter seriam irreais.

Com isto obteve-se para este ensaio, realizado em condições saturadas à amostra I₁₂, um ângulo de atrito $\Phi = 45^\circ$ e uma coesão $c = 9$ kPa.

Do ensaio de corte direto realizado à amostra I₂₂ obtiveram-se os resultados, representados na Figura 31.

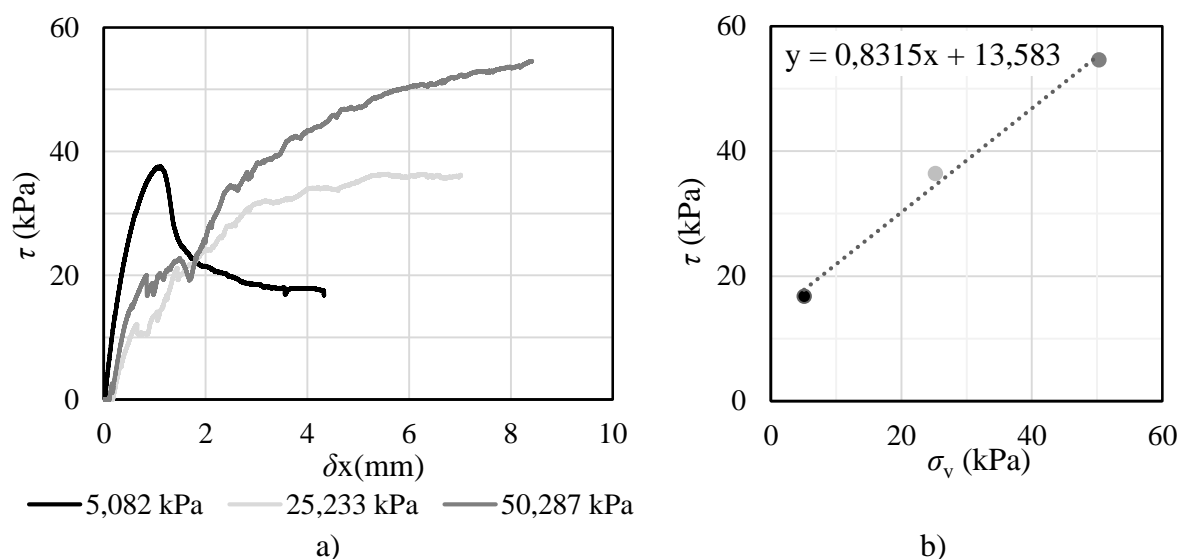


Figura 31 - a) Evolução da tensão de corte em função do deslocamento horizontal; b) Evolução da tensão de corte em função da tensão vertical aplicada (amostra I₂₂)

Da análise da curva de tensão tangencial em função do deslocamento horizontal do primeiro patamar de solitação (i.e., 5,082 kPa) (Figura 31a), verifica-se a existência de uma resistência de pico que não está em conformidade com os restantes patamares. Esta resistência poderá estar associada à desintegração do material quando foi atingida certa tensão, que ao ser cortado fez com que a resistência decaísse para valores residuais, tendo sido este o valor adotado de resistência ao corte, para o patamar em causa. Nos restantes patamares, o solo vai-se deformando a tensão constante (rotura plástica).

Através da execução deste ensaio, realizado à amostra I₂₂, obteve-se um ângulo de atrito $\Phi = 40^\circ$ e uma coesão $c = 14$ kPa.

Ensaio triaxial

A partir dos resultados obtidos através da realização de ensaios triaxiais às amostras I₁₃ e I₂₁, traçaram-se, para cada uma, as curvas de evolução da tensão de corte em função da extensão axial ($q - \varepsilon_a$) por cada solitação (i.e., 5 kPa, 25 kPa e 50 kPa). Com estas curvas determinou-se o módulo de deformabilidade secante (E_{sec}), considerando 50% da tensão de pico. Por conseguinte, obtiveram-se, através da construção do gráfico $s' - t$, os pontos correspondentes ao estado de rotura de cada solitação e traçou-se a reta que melhor os aproximava. Com a

equação da reta obtida e recorrendo às expressões (2) e (3), foi possível determinar os parâmetros de resistência do solo (i. e., ângulo de atrito e coesão).

$$c = \frac{a}{\cos \Phi} \tag{2}$$

$$\Phi = \arcsen(\operatorname{tg} \alpha) \tag{3}$$

Os resultados do ensaio à amostra I₁₃ encontram-se na Figura 32.

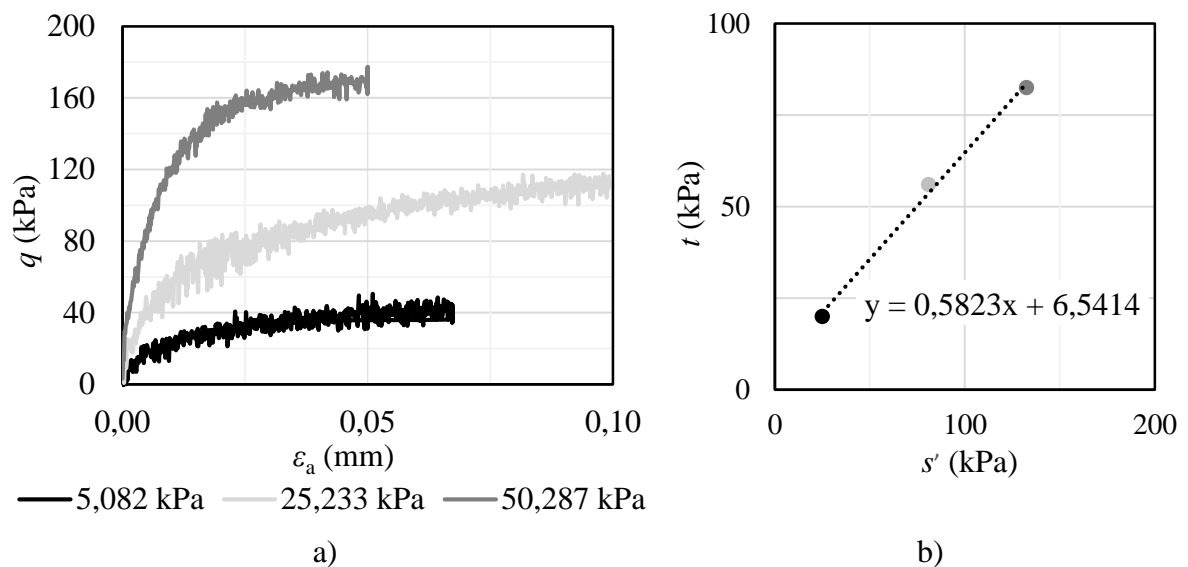


Figura 32 - a) Evolução da tensão de corte em função da extensão axial ($q - \varepsilon_a$); b) Curva $s' - t$ (amostra I₁₃)

Através da realização dos ensaios ao solo do poço 1 (I₁₃), obtiveram-se os resultados da Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados do ensaio triaxial realizado à amostra I₁₃

| Amostra | Patamar de carga (kPa) | E_{sec} (MPa) | Φ (°) | c (kPa) |
|-----------------|------------------------|-----------------|------------|-----------|
| I ₁₃ | 5,082 | 4,0 | 36 | 8 |
| | 25,233 | 5,6 | | |
| | 50,287 | 14,2 | | |

Quanto aos resultados do ensaio à amostra I₂₁, encontram-se representados na Figura 33.

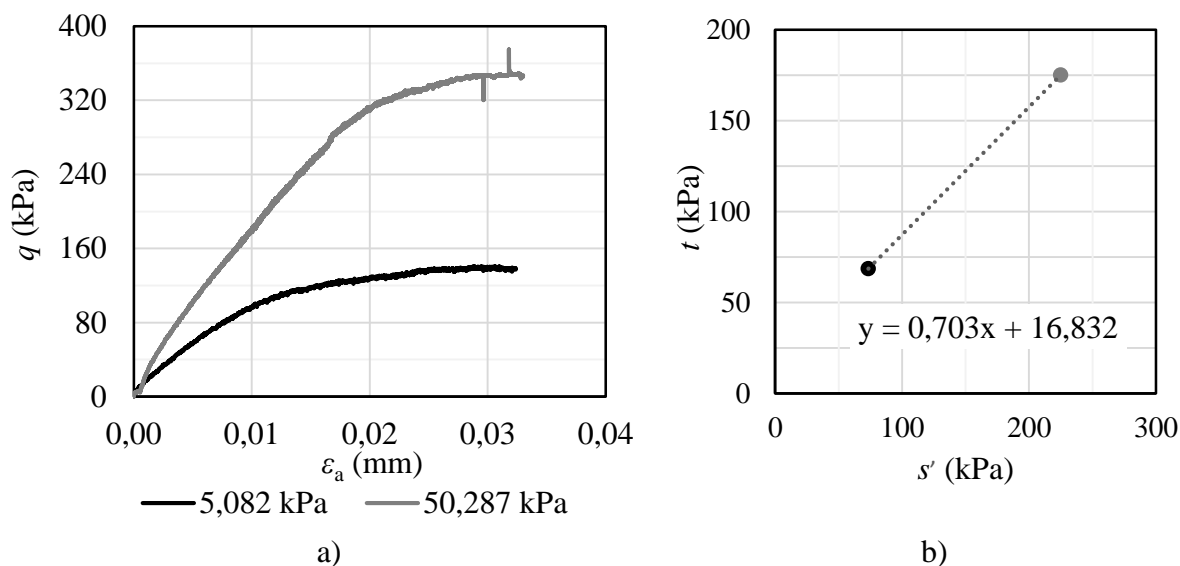


Figura 33 - a) Evolução da tensão de corte em função da extensão axial ($q - \varepsilon_a$); b) Curva $s' - t$ (amostra I₂₁)

Com a execução do ensaio realizado à amostra I₂₁, obtiveram-se os resultados da Tabela 21.

Tabela 21 - Resultados do ensaio triaxial realizado à amostra I₂₁

| Amostra | Patamar de carga (kPa) | E_{sec} (MPa) | Φ (°) | c (kPa) |
|-----------------|------------------------|-----------------|------------|-----------|
| I ₂₁ | 5,082 | 11,7 | 45 | 24 |
| | 50,287 | 17,5 | | |

3.3.4 Síntese de resultados

Sintetizando, dos ensaios de caracterização mecânica realizados aos solos em estudo, foi possível obter os parâmetros de resistência sintetizados na Tabela 22 e os de deformabilidade apresentados na Tabela 20 e 21.

Tabela 22 - Resultados obtidos a partir da realização de ensaios de caracterização mecânica às amostras intactas recolhidas

| Poço | Designação | Ensaio realizado | Profundidade (m) | Φ (°) | c (kPa) |
|------|-----------------|-----------------------|------------------|------------|-----------|
| 1 | I ₁₁ | Corte direto (n/sat.) | 1,10 | 46 | 25 |
| | I ₁₂ | Corte direto (sat.) | | 45 | 9 |
| | I ₁₃ | Triaxial (n/sat.) | | 36 | 8 |
| 2 | I ₂₁ | Triaxial (n/sat.) | 1,10 | 45 | 24 |
| | I ₂₂ | Corte direto (sat.) | 0,40 | 40 | 14 |

Analisando a Tabela 22, e em particular os resultados das amostras I₁₁ e I₁₃, em que se realizou um ensaio de corte e um ensaio triaxial respetivamente em condições não drenadas, verificou-se uma grande discrepância entre os resultados obtidos para o ângulo de atrito e coesão. Esta discrepância poderá ser justificada pela presença de agregados de dimensão considerável nas amostras, que têm maior influência nos resultados obtidos no ensaio de corte devido à menor dimensão do provete utilizado neste ensaio. Com isto, conclui-se que os resultados obtidos através do ensaio triaxial se aproximam melhor dos existentes na realidade.

Analisando os resultados obtidos nas amostras I₂₁ e I₂₂, que correspondem aos dois estratos existentes no poço 2, verificou-se que o estrato de solo mais próximo da superfície possui menores características de resistência comparativamente ao estrato de solo mais profundo.

Comparando os solos existentes nos dois poços, concluiu-se que os existentes no poço 2 possuíam características de resistência bastante superiores às verificadas no solo do poço 1.

3.4 Caracterização dos prumos

Para a realização deste estudo consideraram-se os prumos comumente utilizados nas guardas de segurança instaladas ao longo AAFR, designados por C 125.

As características mecânicas destes prumos encontram-se de acordo com as especificações técnicas de fabrico, segundo o IPQ (2010). A Tabela 23, resume as características principais do aço da classe S235JR, que é utilizado no fabrico destes prumos.

Tabela 23 - Características mecânicas dos prumos considerados no estudo (C 125)

| E (Gpa) | f_y (MPa) | ν |
|-----------|-------------|-------|
| 210 | 235 | 0,3 |

Na Figura 34, encontra-se um esquema devidamente cotado (em milímetros) com as características geométricas dos prumos, em termos de secção transversal e um corte longitudinal.

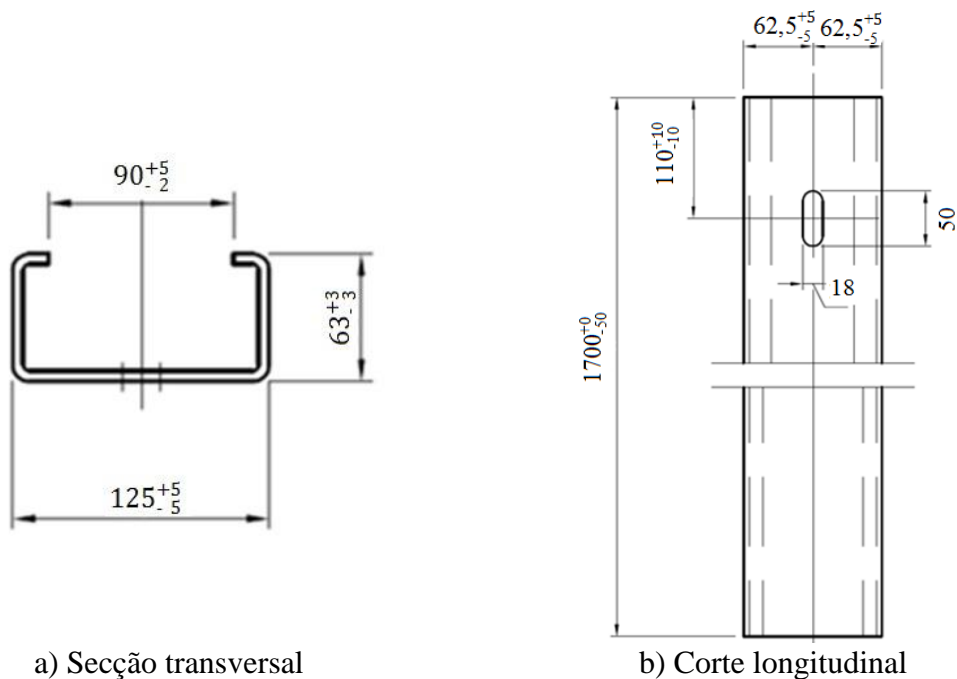


Figura 34 - Características geométricas dos prumos considerados no estudo (C 125)

A secção transversal destes prumos possui uma área $A = 12,80 \text{ cm}^2$, inércia segundo o menor eixo $I = 65 \text{ cm}^4$ e segundo o maior $I = 315 \text{ cm}^4$.

4. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Uma série de ensaios dinâmicos de colisão foram realizados a prumos de guardas de segurança com o objetivo de validar a metodologia numérica apresentada no capítulo seguinte.

Conforme foi explicado na revisão bibliográfica, segundo a norma europeia EN 1317, são vários os ensaios possíveis de realizar para avaliar o desempenho das guardas de segurança, dependendo do nível de retenção que se pretende. Para o caso de estudo, optou-se por simular o ensaio TB11 (Tabela 3), que corresponde ao impacto de um veículo de 900 kg a 100 km/h, com um ângulo de colisão de 20° na guarda.

Uma vez que neste estudo não se avaliou o desempenho de uma guarda, mas apenas o desempenho do sistema solo-prumo, foram realizadas as adaptações necessárias para a realização deste ensaio. Tais alterações serão explicadas ao longo deste capítulo.

4.1 Cravação dos prumos

Para a realização dos ensaios dinâmicos de colisão começou-se pela cravação dos prumos C 125 nos locais previamente definidos. Em cada solo foram cravados 8 prumos, 4 com um comprimento total (h) de 1,50 m e 4 com 1,70 m.

Para a sua cravação no solo, recorreu-se a um equipamento de fixação de prumos designado por bate-estacas, e foi seguido o procedimento ilustrado na Figura 35.



Figura 35 - Procedimento realizado para a cravação dos prumos C 125 no solo

Por forma a facilitar a execução do ensaio foi deixada uma distância de 2 metros entre cada prumo.

Nas Figuras 36a e 36b encontram-se dois registos fotográficos correspondentes aos locais onde foram cravados os prumos, neles é possível visualizar-se a configuração final dos prumos em cada um dos solos considerados neste estudo.



a) Prumos cravados no solo orgânico



b) Prumos cravados no solo residual inorgânico

Figura 36 - Configuração final dos prumos cravados nos solos considerados no estudo

Na Tabela 24 é apresentada uma representação esquemática de um prumo cravado no solo, em que (a) , representa o comprimento não cravado do prumo, (b) , o comprimento de cravação e (h) , o comprimento total do prumo. Para facilitar a identificação de cada um foram-lhes atribuídas diferentes designações em função do tipo de solo em que estes foram instalados.

Tabela 24 - Designação e comprimentos de cravação de cada prumo utilizado no estudo

| Representação esquemática do prumo cravado no solo | Solo | Designação do prumo | h (mm) | b (mm) | a (mm) |
|--|---------------------|---------------------|----------|----------|----------|
| | Orgânico | P _{O1} | 1500 | 840 | 660 |
| | | P _{O2} | | | |
| | | P _{O3} | | | |
| | | P _{O4} | | | |
| | | P _{O5} | 1700 | 1040 | |
| | | P _{O6} | | | |
| | | P _{O7} | | | |
| | | P _{O8} | | | |
| | Residual Inorgânico | P _{I1} | 1700 | 1040 | |
| | | P _{I2} | | | |
| | | P _{I3} | | | |
| | | P _{I4} | | | |
| | | P _{I5} | 1500 | 840 | |
| | | P _{I6} | | | |
| | | P _{I7} | | | |
| | | P _{I8} | | | |
| | | P _{I9} | | | |
| | | P _{I10} | | | |

Devido à extensa área necessária para a cravação dos 8 prumos em cada solo considerado, foi evidente durante o processo de cravação de alguns, que as características do solo apresentavam alguma variabilidade. Por esse motivo alguns dos prumos não foram considerados na realização dos ensaios de colisão.

No caso do solo orgânico, os prumos P_{O7} e P_{O8} apresentaram maior dificuldade durante a sua introdução no solo quando comparados com os restantes, o que pode ser justificado pela maior resistência do solo no local de cravação destes dois prumos, e por esse motivo não foram ensaiados. Já no caso do solo residual inorgânico, os prumos P_{I7} e P_{I8} apresentaram maior facilidade de cravação comparativamente aos restantes, por este motivo, não foram considerados neste estudo.

4.2 Ensaio dinâmico de colisão - 1ª Campanha

Tendo sido esta a primeira vez que se realizaram, na Universidade do Minho (UM), ensaios dinâmicos de colisão a prumos de guardas de segurança, optou-se pela execução dos mesmos em duas campanhas.

Um dos motivos para se executarem duas campanhas foi a impossibilidade de se ensaiarem todos os prumos num só dia, devido à complexidade execução associada a cada ensaio. Outro dos motivos foi o de permitir o melhoramento de eventuais questões relativas ao sistema de ensaio e ao sistema de medição e aquisição de dados, que pudessem surgir com a realização dos ensaios da primeira campanha.

4.2.1 Definição do sistema de ensaio

Depois de realizada a pesquisa bibliográfica acerca dos ensaios dinâmicos de colisão possíveis de realizar a prumos de guardas de segurança para avaliar sua interação com o solo, optou-se pela realização destes recorrendo-se ao sistema de pêndulo gravitacional. A opção por este sistema foi devida às condições de relevo do local onde foram cravados os prumos e aos limitados recursos económicos, aliados também ao tempo limitado que permitisse a construção de um veículo configurado para esse efeito (i.e., um veículo ‘*bogie*’).

Foram vários os autores que utilizaram este sistema, nomeadamente Michie (1970), Gatchell & Michie (1974), Calcote & Kimball (1978) e Nauman (2010), no entanto, das várias soluções utilizadas por estes autores, nenhuma em particular se tornou viável para o caso em estudo, mas em parte todas elas contribuíram para algumas das opções tomadas na execução dos ensaios realizados.

Posto isto, a solução encontrada para se realizarem os ensaios, recorrendo ao sistema de pêndulo, recaiu sobre a utilização de uma retroescavadora que fosse capaz não só de suportar a massa escolhida, mas também que garantisse a estabilidade e segurança necessária durante a realização do ensaio. Na Figura 37 encontra-se representado esquematicamente o sistema de ensaio inicialmente idealizado.

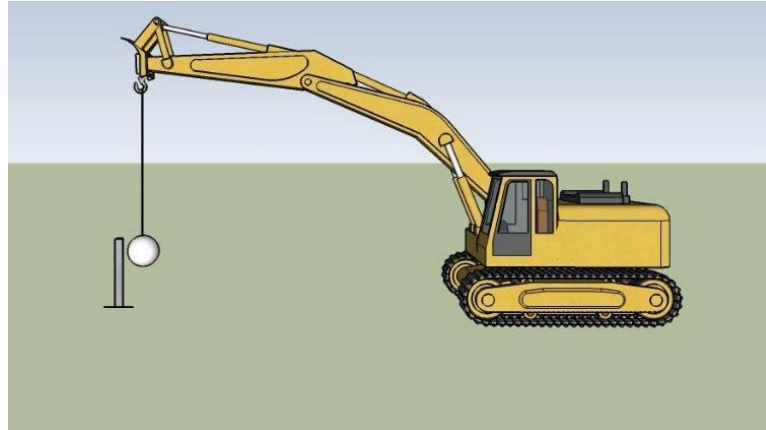


Figura 37 - Representação esquemática do sistema de pêndulo utilizado no estudo

4.2.2 Preparação dos ensaios

Depois de definido o sistema de ensaio, procedeu-se à sua preparação. Para isso, começou-se por definir a massa (m) do pêndulo, selecionou-se a retroescavadora, reuniram-se os materiais e, por fim, calibraram-se os equipamentos necessários à sua realização.

Definição da massa a utilizar

Visto que se pretendia simular o ensaio TB11, procurou-se utilizar uma massa equivalente à definida para o veículo considerado neste ensaio (i.e., cerca de 900 kg).

Inicialmente pensou-se em construir uma massa de betão armado, mas, no entanto, após uma procura no LEST-UMinho, verificou-se a existência de uma laje com as características desejadas para a realização destes ensaios, não tendo sido necessária a construção de uma especificamente para o efeito. Na Figura 38 encontra-se um registo fotográfico da massa de 1053 kg de betão armado utilizada nos ensaios.



Figura 38 - Massa utilizada nos ensaios

Seleção da retroescavadora

Uma vez conhecida a massa a utilizar, selecionou-se uma retroescavadora que possuísse capacidade de suportar à maior altura possível, ou seja, com o seu braço totalmente estendido. Utilizou-se o modelo de retroescavadora M318F, da *Caterpillar*, que pode ser visualizado na Figura 39.



Figura 39 - Retroescavadora utilizada na realização dos ensaios dinâmicos de colisão

Restantes materiais e equipamentos

O passo seguinte realizado na preparação dos ensaios consistiu na aquisição dos materiais e equipamentos necessários à sua realização e à recolha e gravação de dados. Foram utilizados os seguintes materiais:

- a) Um sensor de posição de 200 mm de curso, que permitiu a leitura dos deslocamentos na base do prumo após a colisão (Figura 40a);
- b) Um suporte para a colocação do sensor de posição (Figura 40b);
- c) Uma célula de carga, de capacidade máxima 100 kN, que possibilitou a medição da força aplicada ao prumo ao longo do ensaio (Figura 40c);
- d) Um acelerómetro xyz, com capacidade de medição das componentes de aceleração em 3 eixos perpendiculares (i.e., na direção vertical, lateral e longitudinal) (Figura 40d);
- e) Três acelerómetros de 5 g, com capacidade de medição de acelerações em apenas um eixo (Figura 40e);

- f) Um bloco de madeira, utilizado para absorver parte da energia de impacto e evitar danificar a célula de carga, tal como o utilizado por Gatchell & Michie (1974) (Figura 40f);
- g) Um hardware de aquisição de dados, utilizado por forma a que os dados lidos pelos diferentes dispositivos (i.e., sensor de posição, célula de carga e acelerómetros) pudessem ser registados por um computador (Figura 40g);
- h) Cabo de aço com capacidade máxima 360 kg, utilizado para suportar a massa de betão armado (Figura 40g). Tendo-se utilizado um total de 4 cabos para suportar a massa.

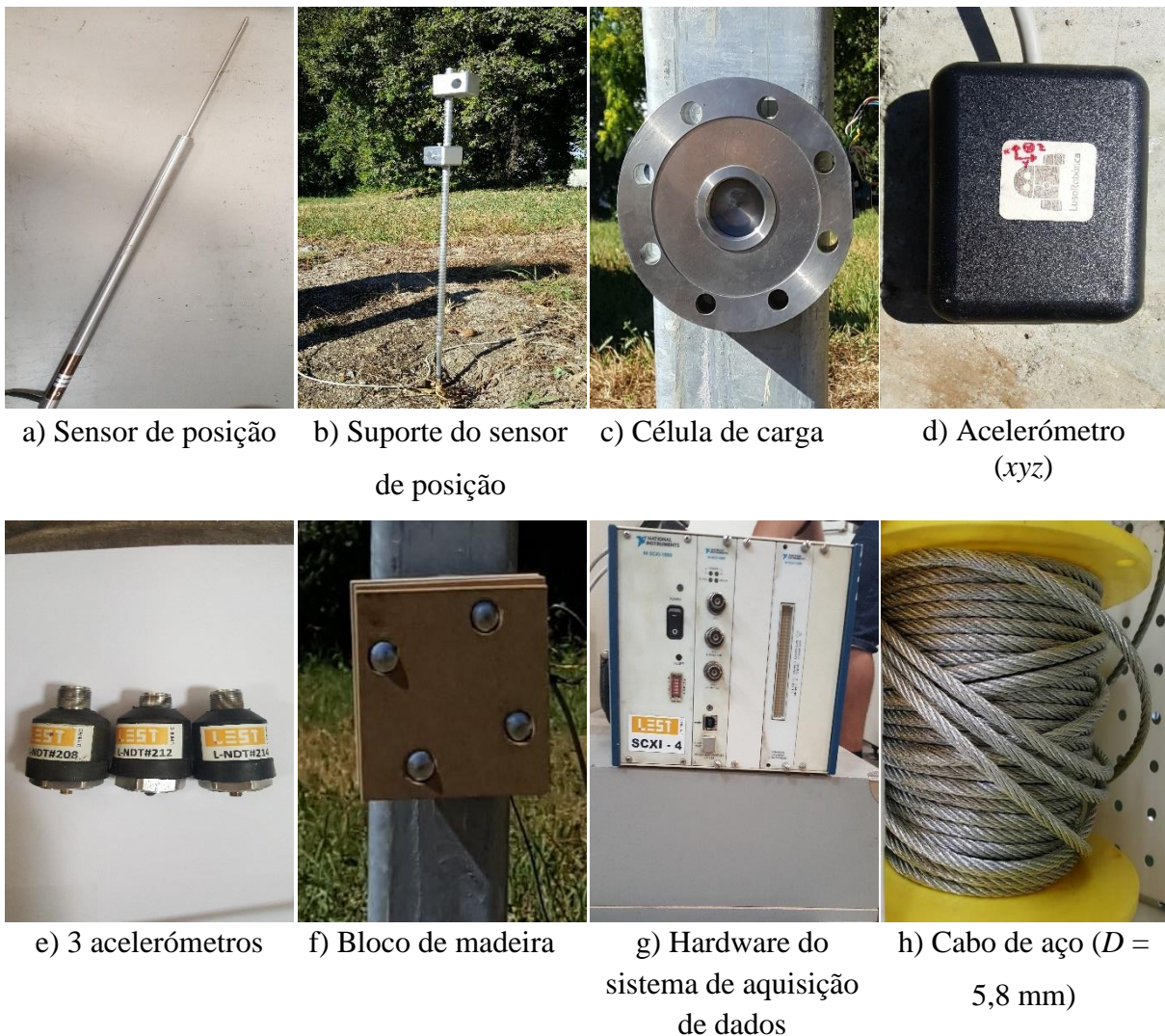


Figura 40 - Equipamentos utilizados na primeira campanha de ensaios

Calibração dos dispositivos de medição

Antes de se proceder à realização dos ensaios efetuaram-se, em laboratório, as ligações entre os equipamentos de medição, o dispositivo de aquisição de dados e o computador. Seguidamente calibraram-se todos os equipamentos de medição. Na Figura 41, é possível visualizar algumas das etapas realizadas ao longo deste procedimento.

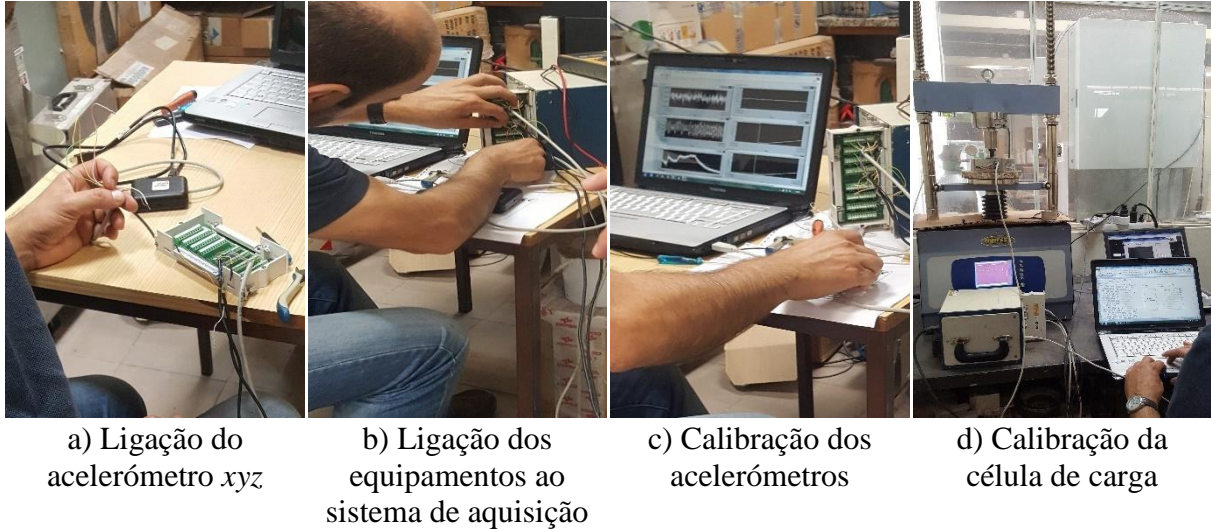


Figura 41 - Procedimento realizado para a calibração dos equipamentos de medição utilizados na primeira campanha de ensaios

4.2.3 Execução dos ensaios dinâmicos de colisão

Na execução dos ensaios de colisão utilizando o sistema de pêndulo considerou-se o procedimento descrito seguidamente:

- Começou-se por anexar a célula de carga ao prumo a cerca de 550 mm acima do nível do solo (Figura 42a);
- Seguidamente, adicionaram-se dois acelerómetros ao prumo. Um aparafusado em linha com a célula de carga e outro colado a cerca de 50 mm abaixo do primeiro (Figura 42b);
- Adicionou-se o bloco de madeira à célula por intermédio de parafusos que penetraram nas suas aberturas (Figura 42c);
- Cravou-se o suporte do sensor de posição no solo com recurso a uma marreta e o mais próximo da superfície do solo possível (Figura 42d);
- Inseriu-se o sensor de posição no suporte e em contato com o prumo (Figura 42e);
- Fez-se passar o cabo de aço pelos buracos existentes na massa de betão e de seguida, estes foram apertados com recurso a cerra-cabos. Depois engataram-se os cabos no guincho da retroescavadora (Figura 42f);

- g) Adicionaram-se dois acelerómetros na massa de betão armado. O acelerómetro *xyz* no seu topo e outro na sua seção transversal (Figura 42g);
- h) Ligaram-se todos os dispositivos de medição ao sistema de aquisição de dados e este ao computador que foi alimentado por um gerador (Figura 42h);
- i) Esticou-se totalmente o braço da retroescavadora até que a massa ficasse no ponto de aplicação do impacto pretendido e mediu-se a altura do hidráulico da máquina nesta posição (Figura 42i);
- j) Fez-se recolher o braço, passou-se uma corrente por dois dos buracos existentes na massa de betão (Figura 42j) e prendeu-se esta última na retroescavadora (Figura 42k);
- k) Voltou-se a esticar o braço até o hidráulico atingir a altura medida para o ponto i) (Figura 42l);
- l) Largou-se a corrente e deu-se o impacto da massa no prumo (Figura 42m);

O procedimento anteriormente exposto foi adotado em todos os prumos ensaiados nesta primeira campanha de ensaios.



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)



h)

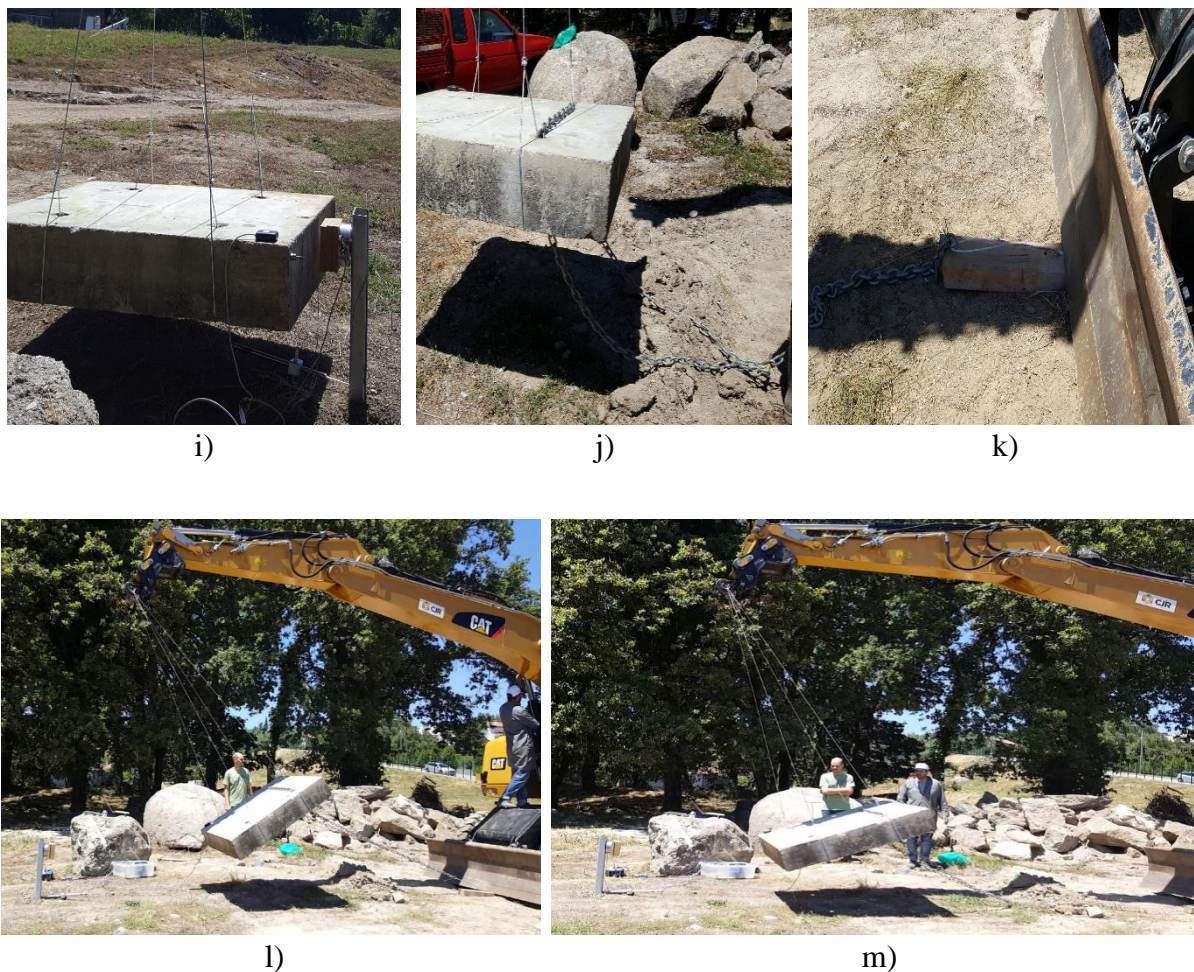


Figura 42 - Procedimento adotado para a execução da primeira campanha de ensaios

4.3 Ensaios dinâmicos de colisão - 2ª Campanha

Infelizmente, devido à impossibilidade de se conseguir em tempo útil (i.e., duração da dissertação) a vinda da retroscavadora, não foi possível realizar os ensaios previstos nesta campanha. No entanto, tendo em conta que, após a realização da primeira campanha de ensaios surgiram alguns aspetos relativos aos ensaios a serem melhorados, descrevem-se, no ponto seguinte, as principais alterações previstas realizar numa segunda campanha de ensaios.

4.3.1 Melhoramento do sistema de ensaio e dos equipamentos

Quanto ao sistema de ensaio propriamente dito (i.e., ensaio de pêndulo) não se sugere qualquer tipo de alteração, garantindo-se desta forma que os ensaios ainda a realizar decorram nas mesmas condições dos executados na primeira campanha. Assim, os resultados obtidos numa

segunda campanha de ensaios poderão ser comparados com os já obtidos na primeira, sem que o sistema de ensaio tenha influência nos mesmos.

Para se facilitar a execução do ensaio, ao invés da utilização de um único cabo de aço com duas marcas para se realizarem os ensaios com energias diferentes, propõe-se a utilização de uma corrente ligada a uma placa metálica (Figura 43) que permita a colocação da corrente entre a pá da retroescavadora e o barrote de madeira, evitando-se desta forma que os cabos se danifiquem à medida que se realizam os ensaios, como o sucedido na primeira campanha de ensaios. Entre a corrente e a placa metálica sugere-se a utilização de um mosquetão que possibilite a realização dos ensaios com as energias pretendidas.



Figura 43 - Placa metálica a utilizar numa segunda campanha de ensaios

Propõe-se também que, numa segunda campanha de ensaios, se utilize um sistema de suporte do sensor de posição mais simples. Uma vez que a utilização do suporte definido na primeira campanha de ensaios implicava a sua cravação e posterior retirada do solo a cada prumo a ensaiar, o implicava uma perda de tempo desnecessária à realização dos ensaios, sugere-se então substituir este, por um como o exemplificado na Figura 44, constituído por uma placa na qual foram soldados pernos, que permitem a cravação do suporte ao solo, e na qual se pode anexar o sensor de posição através de braçadeiras.

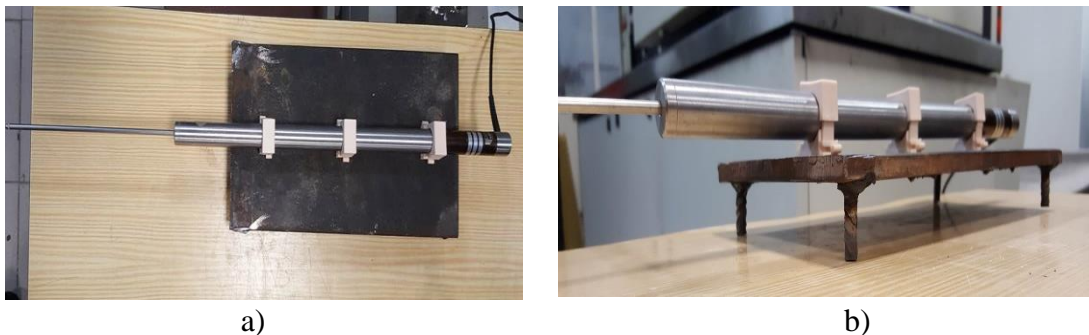


Figura 44 - Suporte do sensor de posição a utilizar numa segunda campanha de ensaios

Da realização dos ensaios da campanha 1, verificou-se que o acelerómetro de 5 g colocado na seção transversal da massa de betão armado, não fornecia informação útil. A ineficiência deste equipamento, pode ser justificada pelo fato de se ter colado o mesmo ao bloco e também ao fato de a massa do pêndulo oscilar ao longo da sua queda. Sugere-se, portanto que, não se utilize este acelerómetro numa segunda campanha de ensaios.

Verificou-se também que o acelerómetro *xyz*, colocado no topo da massa de betão, pode não ter registado o instante inicial do ensaio, ou seja, o momento em que a massa é largada. Pois este apenas foi programado para registar o valor das acelerações 1 segundo antes do impacto no prumo. Como tal, por forma a contornar este problema, numa segunda campanha propõe-se a utilização de um equipamento que permita a medição de ângulos, ou seja, uma bússola de Geólogo (Figura 45).

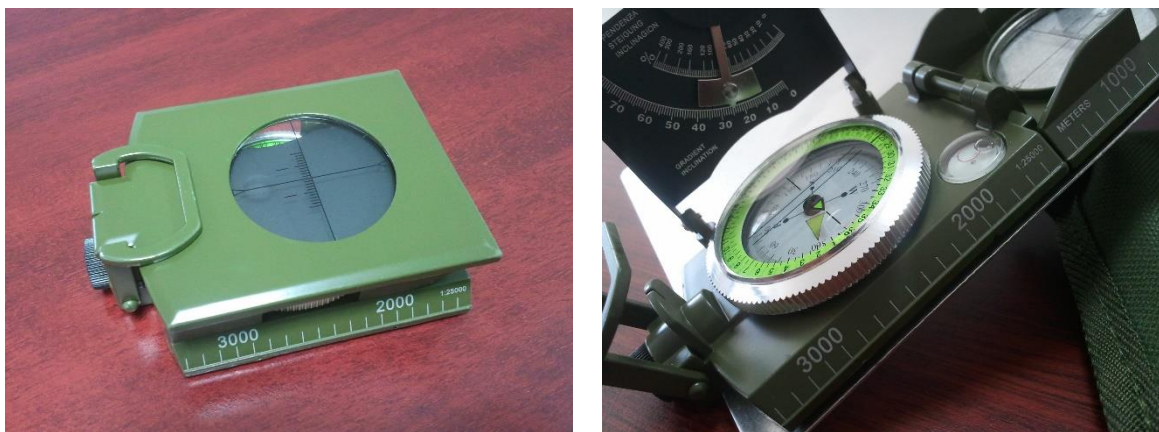


Figura 45 - Bússola de Geólogo proposta a utilizar numa segunda campanha de ensaios

Relativamente ao acelerómetro aparafusado no prumo em linha com a célula de carga, verificou-se que seriam necessárias leituras acima dos 5 g, e por esse motivo, numa segunda campanha, propõe-se a utilização do acelerómetro de 50 g apresentado na Figura 46.



Figura 46 - Acelerómetro de 50 g proposto utilizar numa segunda campanha de ensaios

Quanto ao acelerómetro colocado 50 mm abaixo do ponto de colisão propõem-se manter a sua utilização, embora com recurso a um de 50 g.

Uma vez que o sistema de batente anexado à célula de carga na primeira campanha de ensaios (i.e., o bloco de madeira) dava origem a ruído de grande amplitude no acelerómetro aparafusado em linha com a célula, propõe-se que este, numa segunda campanha de ensaios, seja substituído por um sistema metálico (Figura 47).

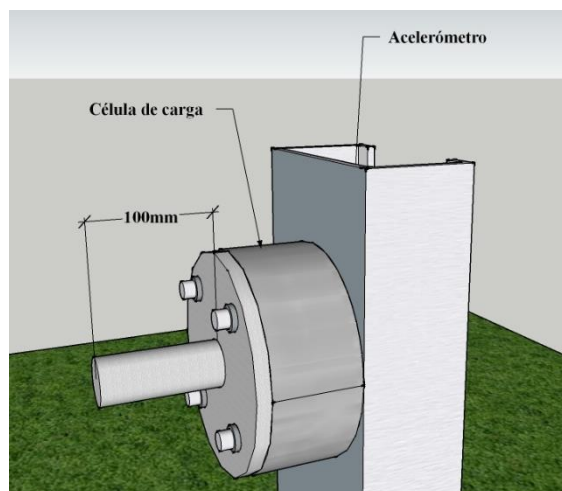


Figura 47 - Sistema de batente proposto utilizar numa segunda campanha de ensaios

4.4 Apresentação e análise dos resultados

Neste ponto serão apresentados os resultados obtidos da realização dos ensaios dinâmicos de colisão. As condições a que cada prumo foi ensaiado, em termos de profundidade de cravação (b), altura do ponto de impacto em relação solo (h_{impacto}), altura do sensor de posição em relação ao solo (h_{sensor}), o ângulo da massa no instante imediatamente antes do início do ensaio (β), a

energia de impacto (E_{impacto}) e a velocidade de impacto (v_{impacto}), encontram-se explanadas na Tabela 25.

Tabela 25 - Condições de ensaio dos prumos considerados no estudo

| Designação do prumo | Tipo de solo | b (mm) | h_{impacto} (mm) | h_{sensor} (mm) | β (°) | E_{impacto} (J) | v_{impacto} (km/h) |
|---------------------|---------------------|----------|---------------------------|--------------------------|-------------|--------------------------|-----------------------------|
| P _{O1} | Orgânico | 840 | 543 | 87 | 35,71 | 6322 | 12,48 |
| P _{O2} | | 840 | 613 | 90 | 37,91 | 7095 | 13,22 |
| P _{O3} | | 840 | 580 | 60 | 23,69 | 2834 | 8,35 |
| P _{O4} | | 840 | 595 | 65 | 21,80 | 2405 | 7,69 |
| P _{O5} | | 1040 | 550 | 90 | 31,48 | 4949 | 11,04 |
| P _{O6} | | 1040 | 580 | 85 | 26,45 | 3520 | 9,31 |
| P _{I1} | Residual Inorgânico | 1040 | 585 | 60 | 30,66 | 4700 | 10,76 |

Recorreu-se aos registos fotográficos do ensaio para determinar a inclinação (β) da massa de betão armado no momento imediatamente antes de ser largada. O método utilizado para a determinação desse valor encontra-se no Anexo A.

Da análise da Tabela 25, é possível verificar que os 4 primeiros prumos cravados no solo orgânico de comprimento total $h = 1500$ mm e de profundidade de cravação $b \approx 840$ mm, foram ensaiados com diferentes condições de impacto. Os primeiros dois (i.e., P_{O1} e P_{O2}) ensaiaram-se a uma velocidade superior à dos outros dois (i.e., P_{O3} e P_{O4}). Relativamente aos restantes prumos cravados neste solo, de comprimento total $h = 1700$ mm, cravados a uma profundidade $b \approx 1040$ mm, consideraram-se uma vez mais velocidades diferentes na realização de cada ensaio. O ensaio realizado ao prumo P_{O5} ocorreu a uma velocidade superior à definida na realização do ensaio ao prumo P_{O6}.

No solo inorgânico o prumo P_{I1}, de comprimento total $h = 1700$ mm e profundidade de cravação de 1040 mm, foi ensaiado a uma velocidade equivalente à considerada nos ensaios realizados aos prumos P_{O1}, P_{O2} e P_{O5}.

Com a consideração de duas velocidades distintas, pretendeu-se avaliar a influência do tipo de solo e da profundidade de cravação no desempenho do sistema solo-prumo.

4.4.1 Evolução da força em função do tempo ($F - t$)

Com a colocação da célula de carga no ponto de aplicação do impacto foi possível registar a evolução da força no decorrer do ensaio. Com base nesses registos foi possível traçar as curvas de evolução da força em função do tempo ($F - t$).

Na Figura 48 encontram-se representadas as curvas $F - t$ obtidas através da realização de ensaios de colisão aos prumos cravados no solo orgânico.

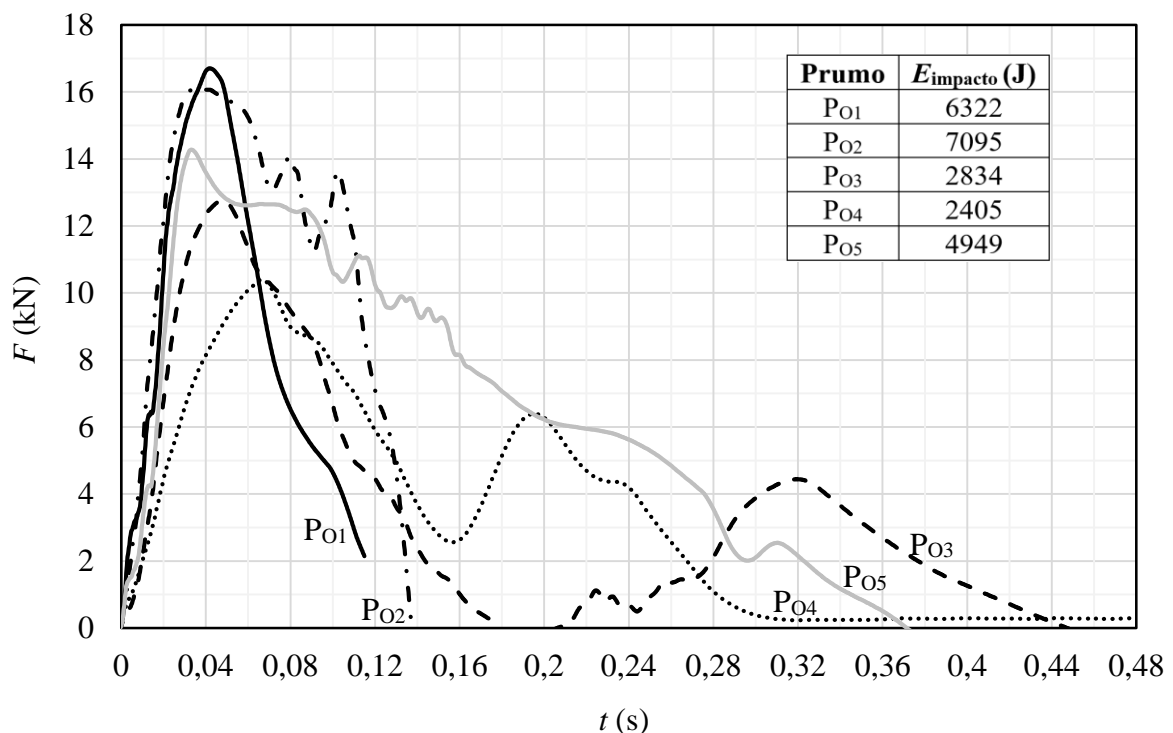


Figura 48 - Curvas $F - t$ obtidas através da realização dos ensaios de colisão aos prumos cravados no solo orgânico

Analisando as curvas $F - t$ obtidas (Figura 48) verifica-se que, de modo geral, estas possuem um comportamento similar, em todas a força vai aumentando nos instantes iniciais até ser atingindo um pico de força máxima, imediatamente após este, a força vai diminuindo até se dissipar completamente.

Por forma a analisarem-se os resultados com maior rigor, retirou-se a força máxima obtida em cada ensaio das curvas exibidas na Figura 48, sendo estas apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26 - Força máxima registada nos ensaios realizados a prumos cravados no solo orgânico

| Designação do prumo | b (mm) | E_{impacto} (J) | $F_{\text{máx}}$ (kN) |
|---------------------|----------|--------------------------|-----------------------|
| P _{O1} | 840 | 6322 | 16,65 |
| P _{O2} | 840 | 7095 | 16,10 |
| P _{O3} | 840 | 2834 | 12,85 |
| P _{O4} | 840 | 2405 | 10,50 |
| P _{O5} | 1040 | 4949 | 14,37 |

Pela análise da Tabela 26 constata-se que os prumos ensaiados com maior energia de impacto atingiram uma força máxima superior à registada nos prumos ensaiados com menor energia. É ainda possível verificar que em todos os ensaios se deu a plastificação do prumo, uma vez que em todos eles a força máxima do sistema registada pela célula de carga, foi muito superior à força máxima resistente (F_{Rd}) do prumo calculada (Anexo B) que seria de 6,70 kN.

Na Figura 49, encontra-se representada a curva $F - t$, obtida através da realização do ensaio de colisão ao prumo cravado no solo residual inorgânico.

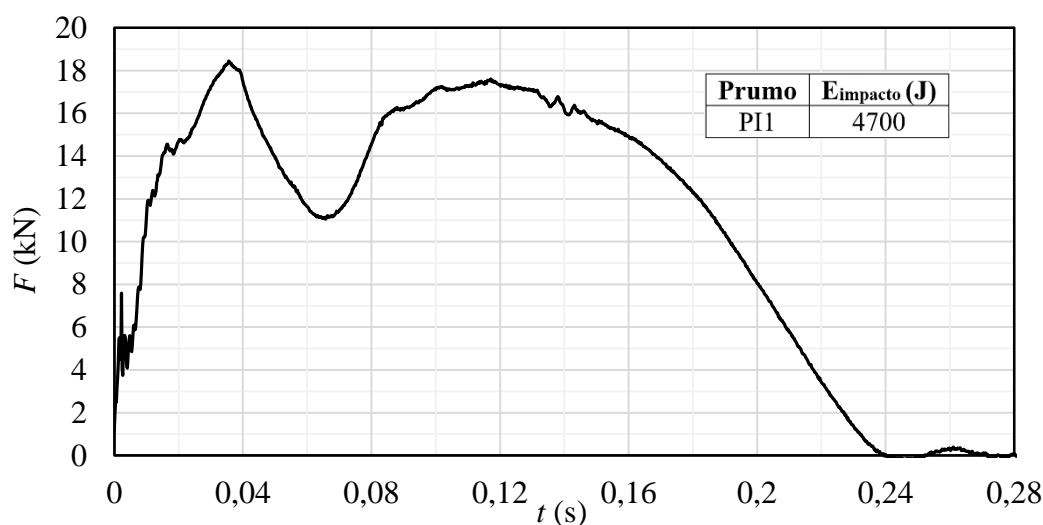


Figura 49 - Curva $F - t$ obtida através da realização do ensaio de colisão ao prumo cravado no solo residual inorgânico

Relativamente ao resultado obtido em termos de $F - t$ para o prumo P₁₁ verificou-se que, mesmo comparando este ensaio com os já realizados a energias semelhantes, a força máxima registada neste foi superior à registada nos ensaios realizados no solo orgânico. Tal poderá ser devido ao facto do solo residual inorgânico apresentar melhores características de resistência.

Para além disso, verifica-se que o tempo de duração do ensaio neste prumo foi cerca de metade do verificado nos ensaios realizados no solo orgânico e que a resposta foi diferente da obtida nos prumos instalados no solo orgânico, pois, depois da força atingir o máximo manteve-se um certo período de tempo constante e só depois foi dissipando gradualmente.

4.2.1 Evolução dos deslocamentos ao longo do tempo ($d - t$)

Com a colocação do sensor de posição próximo da superfície do solo e em contacto com o prumo, foi possível registar a evolução dos deslocamentos do sistema solo-prumo, durante e após o impacto.

Na Figura 50, estão representadas as curvas de evolução do deslocamento em função do tempo ($d - t$) dos prumos ensaiados no solo orgânico.

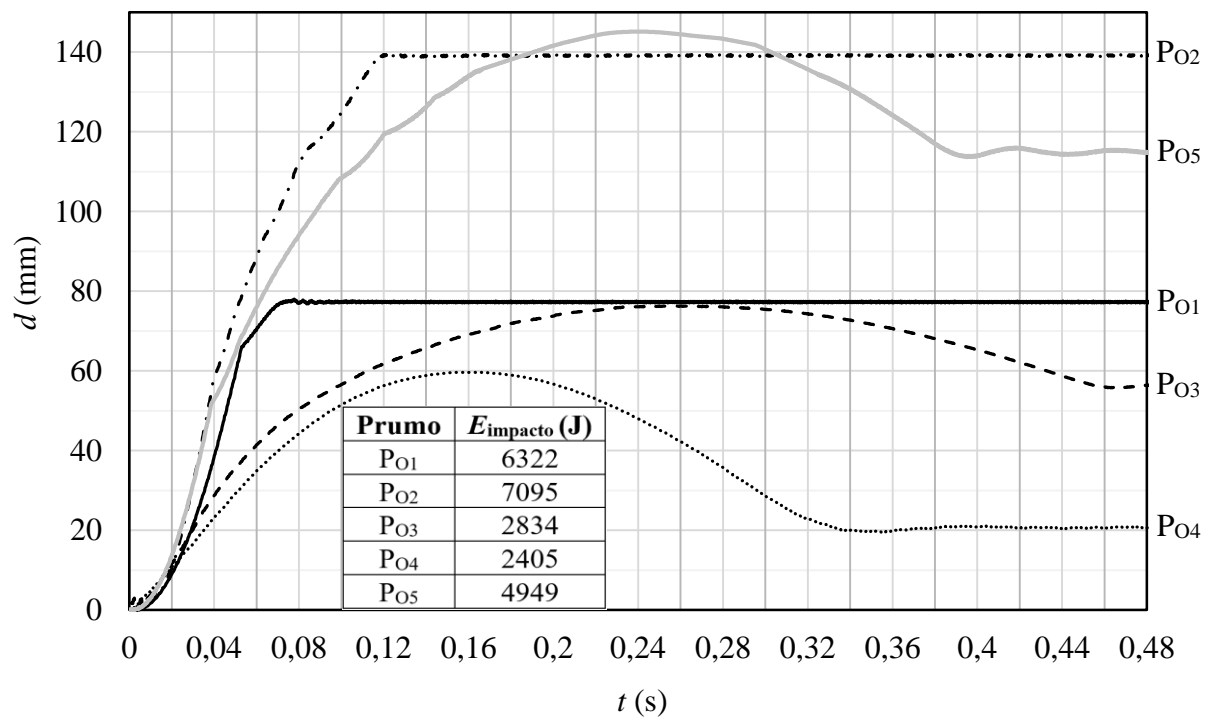


Figura 50 - Curvas $d - t$ obtidas através da realização dos ensaios de colisão aos prumos cravados no solo orgânico

Analisando a curva do prumo P_{O1} da Figura 50, é possível verificar que neste primeiro ensaio o sensor de posição atingiu o seu fim de curso, ou seja, o curso do sensor não foi suficiente para se registarem os deslocamentos acontecidos no sistema. Tal sucedeu-se, pois, sendo este o

primeiro ensaio realizado, não se sabia o nível de deslocamentos que poderiam ocorrer no sistema.

Observando a curva $d - t$ obtida do ensaio ao prumo P_{O2}, facilmente se conclui que tal como no ensaio anterior, o sensor ainda não possuía curso suficiente, embora neste ensaio, já se tenha tido o cuidado de aumentar o curso disponível do sensor.

Ao contrário do sucedido nos ensaios anteriores o gráfico deslocamento em função do tempo do prumo P_{O3} não saturou, devido ao fato de se ter realizado este ensaio com uma menor energia de impacto, o que se traduziu em menores deslocamentos, tendo-se obtido uma resposta completa, sendo assim possível proceder-se à sua análise. Analisando a curva obtida é possível verificar um aumento acentuado do deslocamento nos primeiros instantes do ensaio, devido à cedência do solo e do prumo como resultado do impacto, atingindo um pico máximo de deslocamento de 76,28 mm aos 0,260 segundos. A partir desse instante, verifica-se uma diminuição no deslocamento que poderá ser justificada pela recuperação do solo após o impacto.

Da análise da curva do prumo P_{O4}, verifica-se uma resposta similar à obtida no ensaio realizado ao prumo P_{O3}, tal como seria de esperar, pois este ensaio foi realizado considerando uma energia de impacto semelhante. No entanto, neste registou-se um pico máximo de deslocamento menor (i.e., de 59,54 mm) atingido aos 0,161 segundos. Depois de atingido esse pico existiu uma maior recuperação do estado inicial do sistema quando comparado com o verificado no anterior. Tal, poderá ser justificado pela recuperação do solo e do prumo, uma vez que neste ensaio poderá não ter ocorrido a plastificação total do prumo, tendo este recuperado parte do seu estado inicial.

Analisando a curva $d - t$ obtida do prumo P_{O5}, verificou-se que, a resposta foi semelhante à obtida no prumo P_{O3}, verificando-se nesta, maiores níveis de deslocamento, resultado da maior energia de impacto considerada neste ensaio.

Na Figura 51, está representada a evolução do deslocamento em função do tempo ($d - t$) do prumo ensaiado no solo residual inorgânico.

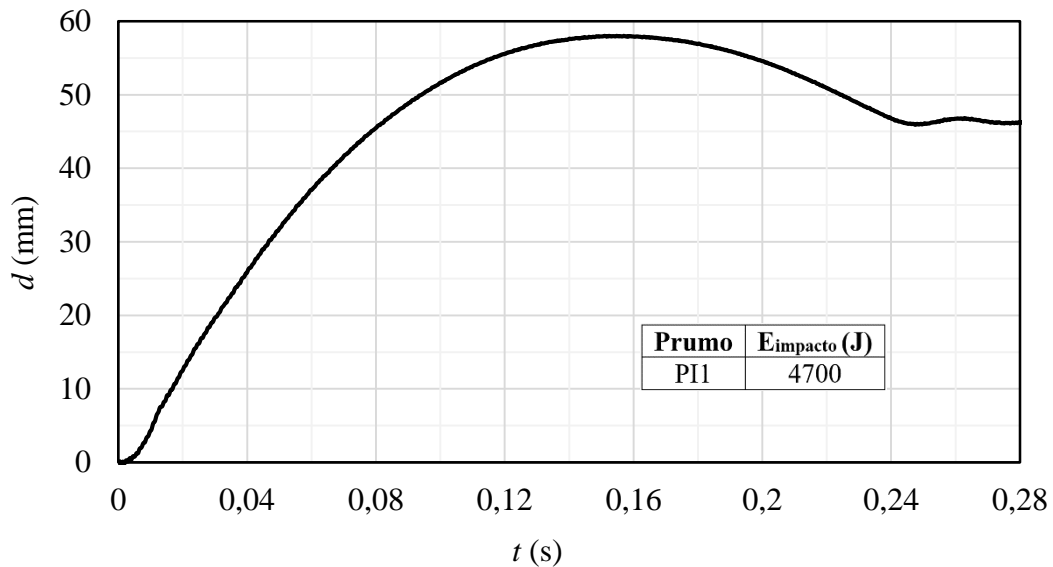


Figura 51 - Curva $d - t$ obtida através da realização do ensaio de pêndulo ao prumo P₁₁ cravado no solo residual inorgânico

Analisando a curva $d - t$ obtida do ensaio realizado ao prumo P₁₁, cravado no solo residual inorgânico, verificou-se que a resposta obtida foi semelhante à dos prumos ensaiados no solo orgânico, registando-se um deslocamento máximo de 58 mm e após a recuperação do solo obteve-se um deslocamento final de 46 mm.

Como este ensaio decorreu com uma energia semelhante à dos prumos P₀₁, P₀₂ e P₀₅, e neste se observaram deslocamentos muito inferiores, verifica-se que existiu uma grande influência do tipo de solo nos resultados obtidos em termos de deslocamento e mais uma vez se verifica que o tempo necessário a que ocorresse esse deslocamento foi cerca de metade do verificado no solo orgânico.

4.4.2 Evolução da força em função do deslocamento ($F - d$)

Com as leituras de força e deslocamento registadas durante os ensaios, foi ainda possível construir as curvas da evolução da força lida no ponto de impacto em função do deslocamento registado na base do prumo ($F - d$). Na Figura 52, encontram-se as curvas obtidas para cada um dos prumos ensaiados, cravados no solo orgânico.

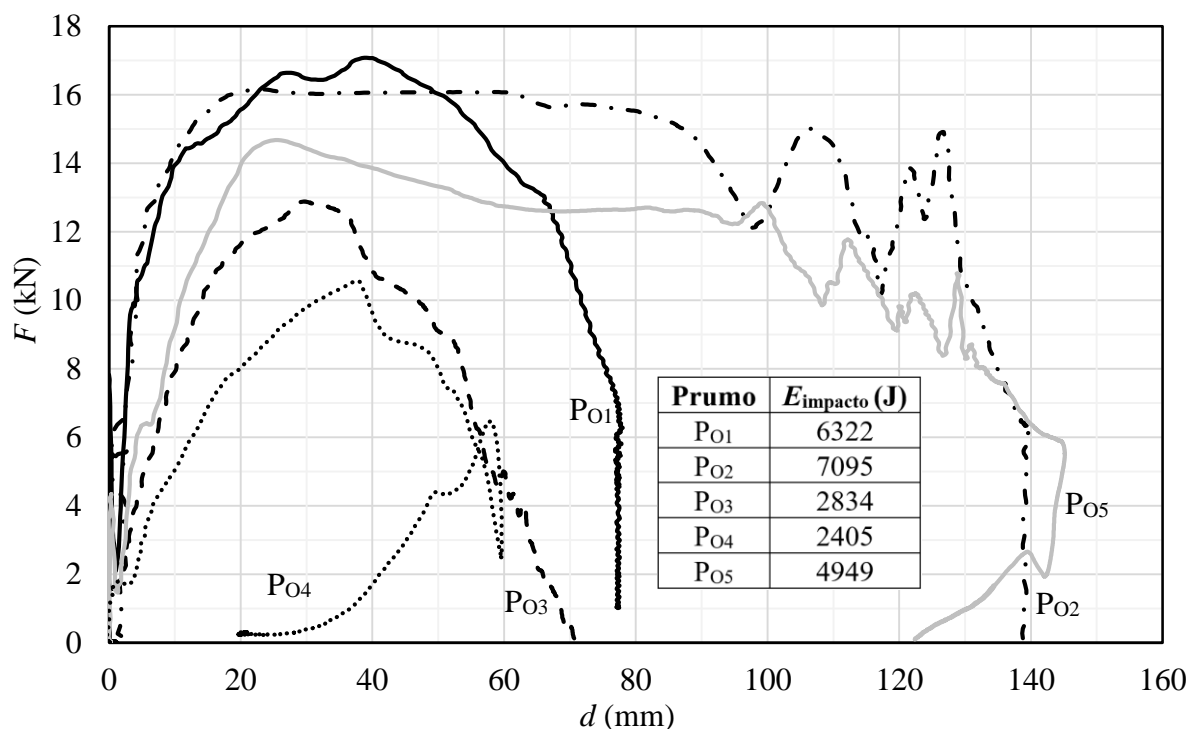


Figura 52 - Curva $F - d$ obtida através da realização do ensaio de pêndulo aos prumos cravados no solo orgânico

Da análise da Figura 52, verifica-se que os prumos ensaiados com uma energia de impacto superior registaram maiores valores de força e que para além disso, mesmo tendo em conta que o sensor de posição saturou para alguns destes, é ainda possível verificar que os deslocamentos que se obteriam seriam muito superiores, aos observados nos prumos ensaiados com uma energia de impacto menor.

Também se verifica que na parte final da curva $F-d$ dos ensaios P_{O4} e P_{O5} existiu uma diminuição do deslocamento à medida que se ia dissipando a força, resultado da recuperação de parte do estado inicial do sistema solo-prumo.

Na Figura 53, encontra-se representada a curva $F - d$ obtida para o prumo P₁₁, cravado no solo residual inorgânico.

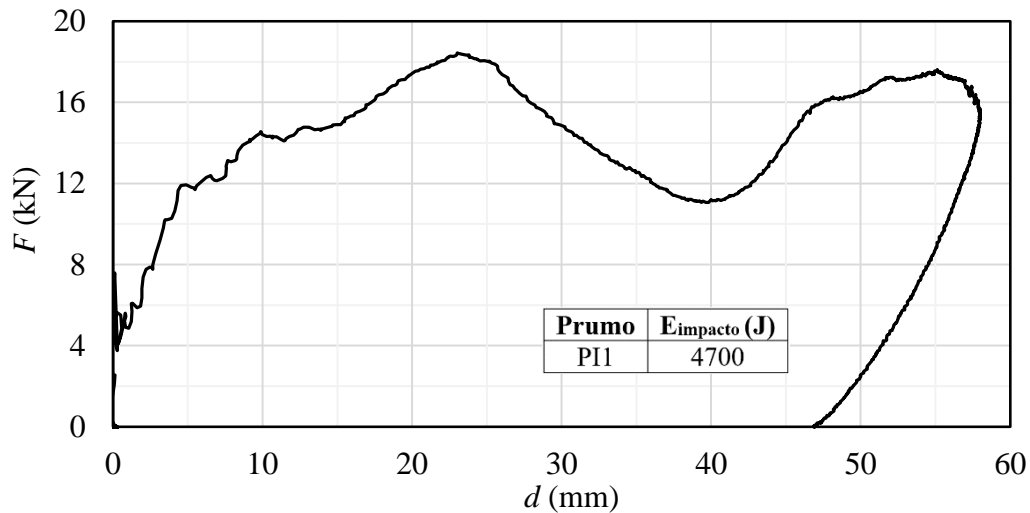


Figura 53 - Curva $F - d$ obtida através da realização do ensaio de pêndulo ao prumo P_{II} cravados no solo residual inorgânico

Da análise da curva $F - d$ obtida no ensaio realizado ao prumo P_{II}, observa-se que neste ensaio se atingiram maiores níveis de força, e é ainda possível verificar que à medida que a força decresce o deslocamento vai diminuindo devido à recuperação de parte do estado inicial do sistema.

4.4.3 Evolução das acelerações em função do tempo ($a_g - t$)

Na primeira campanha de ensaios utilizaram-se os registos efetuados pelos 4 acelerómetros instalados no sistema de ensaio (i.e., na massa de betão, no ponto de impacto no prumo e 50 mm abaixo deste) para se traçarem as curvas de aceleração em função do tempo.

As leituras efetuadas pelos acelerómetros colocados na massa de betão armado e 50 mm abaixo do ponto de impacto do prumo não forneceram informação útil, visto que, por se tratarem de acelerómetros com capacidade máxima de leitura de 5 g, saturaram durante a fase mais importante do ensaio, ou seja, o momento do impacto. Para além disso, o fato de o método utilizado para a sua fixação no prumo e na massa, ter sido por colagem pode também ter interferido nos resultados obtidos. Por esse motivo não serão apresentados os resultados das leituras destes dois acelerómetros.

Relativamente ao acelerómetro aparafusado no ponto de impacto em linha com a célula de carga, que também possuía uma capacidade máxima de leitura de 5 g, ocorreu assim como nos

restantes, a sua saturação. Neste caso, talvez pelo método de fixação deste ter sido através de aparafusamento conseguiu-se obter parte da resposta deste ensaio em termos de acelerações. Por forma a se conseguir obter a resposta completa desde o momento de impacto, utilizou-se a ferramenta MATLAB para, com base na resposta obtida do ensaio, se estimar a sua resposta completa.

Na Figura 54, encontra-se a resposta obtida diretamente do acelerómetro colocado no ponto de impacto.

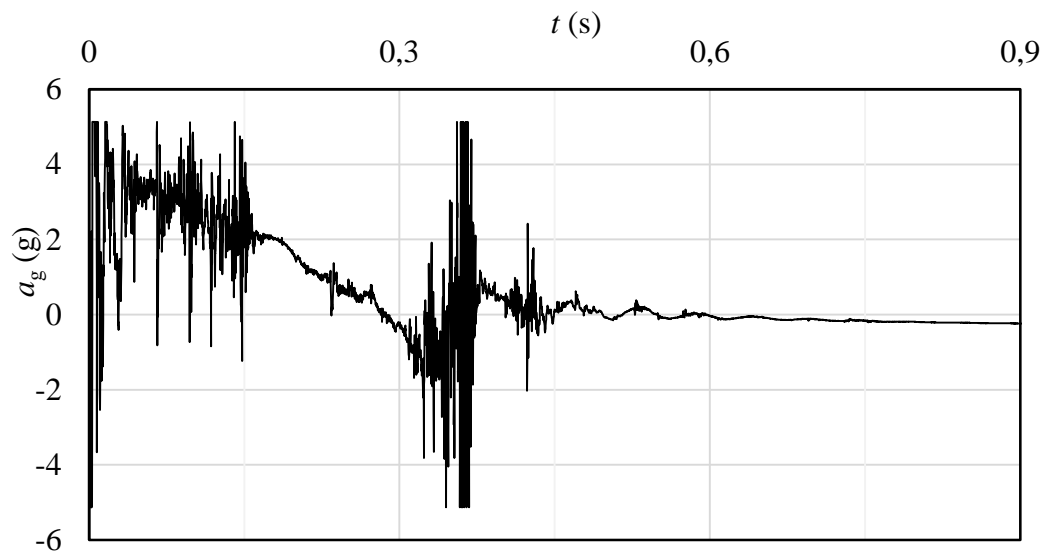


Figura 54 - Curva obtida em termos de acelerações em função do tempo do acelerómetro colocado no ponto de impacto do prumo P_{O4}

Observando a Figura 54 rapidamente se depreende que o acelerómetro saturou para valores correspondentes à sua capacidade máxima de leitura (i.e., 5 g). No entanto, com o decorrer do ensaio foi ainda possível registar as leituras das acelerações depois do impacto. Com o objetivo de se saber a capacidade máxima de leitura dos acelerómetros a instalar no sistema numa segunda campanha de ensaios, utilizaram-se os valores de acelerações registados por forma a estimar-se toda a resposta em termos de aceleração em função do tempo em MATLAB (Figura 55).

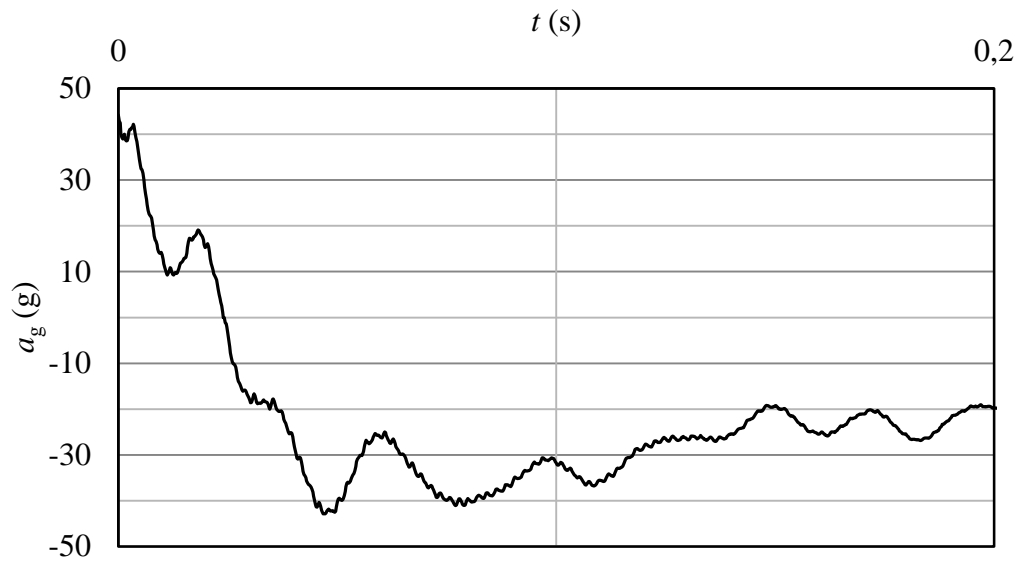


Figura 55 - Curva de aceleração em função do tempo do prumo P₀₄ (MATLAB)

4.4.4 Deslocamento final do sistema

Depois de realizados todos os ensaios dinâmicos de colisão, determinaram-se, com recurso a uma malha quadrangular (5 cm × 5 cm), os deslocamentos finais do sistema.

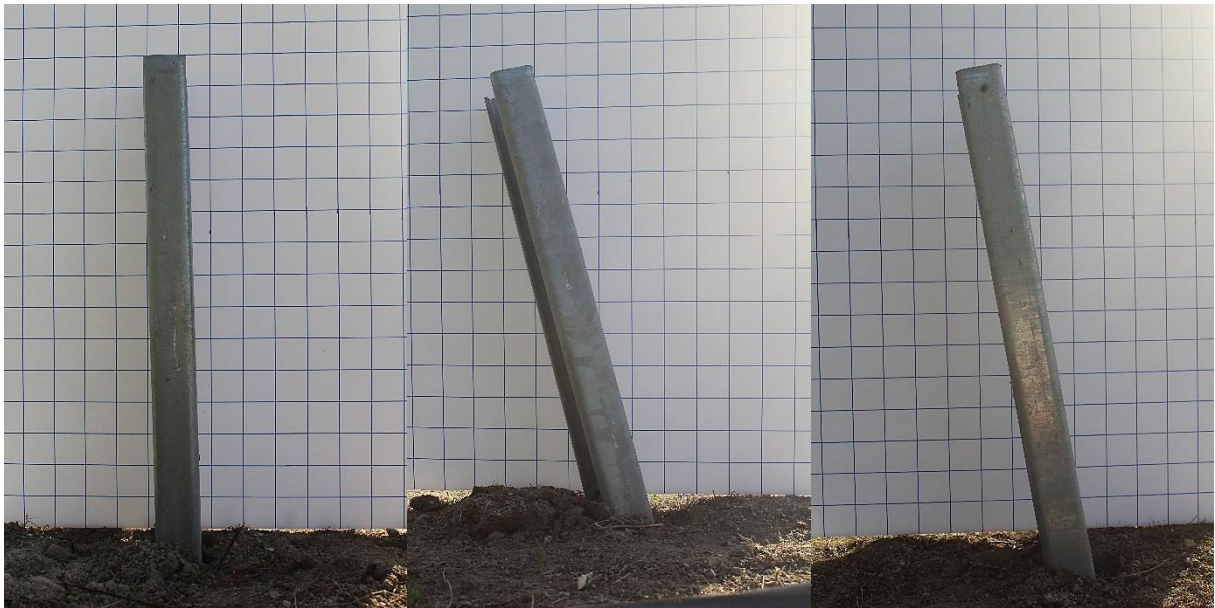
Na Figura 56, encontram-se os registos fotográficos obtidos da realização deste procedimento, para os prumos cravados no solo orgânico.



a) P₀₁ - 555 mm

b) P₀₂ - 345 mm

c) P₀₃ - 250 mm



d) P_{O4} - 40 mm

e) P_{O5} - 260 mm

f) P_{O6} - 150 mm

Figura 56 - Deslocamentos finais dos prumos cravados no solo orgânico

Da análise da Figura 56 é possível verificar que os prumos ensaiados com uma maior energia (i.e., P_{O1}, P_{O2} e P_{O5}) apresentaram um maior nível de deslocamento final em relação aos restantes. Comparando o prumo P_{O5} cravado a uma profundidade de 1040 mm, verificou-se que este possuiu um menor deslocamento final que os prumos P_{O1} e P_{O2} cravados a 840 mm e ensaiados com uma energia de impacto próxima, demonstrando alguma influência do fator profundidade de cravação. O mesmo se verificou no caso do prumo P_{O6} em relação ao P_{O3}, ensaiados a menor energia.

Na Figura 57, encontra-se o registo fotográfico do procedimento realizado para a medição do deslocamento final do sistema do prumo cravado no solo residual inorgânico.

Da análise da Figura 57 verifica-se que o prumo P_{I1} cravado no solo residual inorgânico a uma profundidade de 1040 mm obteve um deslocamento final no topo do prumo de 220 mm. Comparando este deslocamento com o obtido no prumo P_{O5} (260 mm), verifica-se que, existiu influência do tipo de solo no comportamento do sistema, resultando num menor deslocamento final no topo do prumo.

a) P₁₁ - 220 mmFigura 57 - Deslocamentos finais do prumo P₁₁ cravado no solo residual inorgânico

Para além dos deslocamentos finais do sistema também foi possível, após a realização de cada ensaio, determinar o ponto de flexão (Figura 66f) do prumo, apresentando-se a distância desde a superfície do solo até esse ponto na Tabela 27. Na mesma Tabela encontram-se sintetizados os valores em termos de energia de impacto e deslocamento final do sistema registados em cada ensaio.

Tabela 27 - Deslocamento final do sistema obtido para cada prumo ensaiado

| Designação do prumo | Tipo de solo | Energia de impacto (J) | Deslocamento final (mm) | Ponto de flexão (mm) |
|---------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|
| P _{O1} | Orgânico | 6322 | 555 | 170 |
| P _{O2} | | 7095 | 345 | 160 |
| P _{O3} | | 2834 | 250 | 110 |
| P _{O4} | | 2405 | 40 | 80 |
| P _{O5} | | 4949 | 260 | 155 |
| P _{O6} | | 3520 | 150 | 130 |
| P ₁₁ | Residual Inorgânico | 4700 | 220 | 80 |

Da análise da Tabela 27 é possível verificar que no caso dos prumos ensaiados no solo orgânico o ponto de flexão diminuiu com a diminuição da energia de impacto, e que o ponto de flexão no solo orgânico foi sempre superior ao verificado no solo residual inorgânico.

5. METODOLOGIA NUMÉRICA

Após a realização dos ensaios laboratoriais aos solos e dos ensaios dinâmicos de colisão ao sistema, procedeu-se à elaboração de uma metodologia numérica capaz de simular a resposta do sistema solo-prumo obtida experimentalmente, de modo a permitir a validação da metodologia desenvolvida. Para a desenvolver recorreu-se a dois programas de análise de elementos finitos designados por RS² 9.0 e RS³ 1.0, ambos desenvolvidos pela Rocscience. Utilizaram-se estes dois programas pois um permite uma análise dinâmica bidimensional do sistema (i.e., RS² 9.0), enquanto que o outro permite realizar uma análise tridimensional de forma estática, não sendo neste último possível realizar uma análise dinâmica (i.e., RS³ 1.0).

Ao longo deste capítulo será descrita toda a metodologia executada para o desenvolvimento dos modelos em ambos os programas. Posteriormente, serão analisados os resultados e comparados com os obtidos nos ensaios de colisão de modo a atestar a metodologia desenvolvida. Nas Tabelas 28 e 29, encontram-se resumidas as propriedades dos solos e do prumo consideradas na realização da metodologia numérica, em que p representa a profundidade a que as amostras de solo foram recolhidas.

Tabela 28 - Propriedades dos solos utilizadas nos programas de análise numérica (RS² 9.0 e RS³ 1.0)

| Solo | p (m) | γ (kN/m ³) | E_{sec} (MPa) | Φ (°) | c (kPa) | ν |
|------------|------------|----------------------------------|--------------------|---------------|--------------|-------|
| Orgânico | 1,10 | 16,97 | 5,60 | 35,61 | 8,05 | |
| Residual | 0,40 | | | 39,74 | 13,58 | 0,30 |
| Inorgânico | 1,10 | 18,74 | 11,70 | 44,67 | 23,67 | |

Tabela 29 - Propriedades do prumo considerado no estudo (RS² 9.0 e RS³ 1.0)

| Prumo | E (GPa) | f_y (MPa) | ν | A (cm ²) | I_{min} (cm ⁴) | $I_{máx}$ (cm ⁴) |
|-------|--------------|----------------|-------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| C 125 | 210 | 235 | 0,30 | 12,80 | 65 | 315 |

5.1 Análise numérica bidimensional (RS² 9.0)

5.1.1 Modelação do maciço terroso e do prumo

O primeiro passo realizado para a definição do modelo numérico recorrendo ao programa RS² 9.0, consistiu na definição das fronteiras externas do maciço (i.e., 7,0 m de comprimento por 3,4 m de altura). Utilizaram-se estes limites pois *in situ* o solo não sofreu deformação como resultado da solicitação aplicada no prumo.

Seguidamente definiram-se as fronteiras existentes entre os diferentes solos. Devido à impossibilidade de se simular o comprimento não cravado do prumo foi criada uma camada de espessura igual a esse comprimento (i.e., 0,66 m). Depois atribuíram-se as respetivas propriedades a cada solo conforme a Tabela 28, e à camada correspondente ao comprimento não cravado, atribuíram-se características de elevada resistência mecânica e baixa rigidez (i.e., baixo módulo de deformabilidade) para que esta não interferisse nos resultados. Ou seja, um peso volúmico $\gamma = 1 \text{ kN/m}^3$, uma coesão de $c = 100000 \text{ kPa}$, um ângulo de atrito de $\Phi = 0^\circ$, um módulo de elasticidade de $E = 1 \text{ kPa}$ e um coeficiente de Poisson $\nu = 0,01$.

Quanto ao critério de rotura utilizado consistiu no tipicamente considerado quando se analisam solos, o critério de rotura de *Mohr Coulomb*.

Para se definirem as condições iniciais de tensão *in situ* selecionou-se a opção ‘Gravity’ para se definir um campo de tensão que varia com a profundidade, pois o solo em análise foi recolhido relativamente próximo da superfície. Definiu-se a superfície do solo a 2,74 metros e utilizou-se a expressão empírica definida por Jaky (1944), para solos incoerentes de ângulo de atrito Φ , para determinar simplifcadamente o coeficiente de impulso em repouso (K_0) (Expressão 4).

$$K_0 = 1 - \text{sen } \Phi \quad (4)$$

Relativamente à malha de elementos finitos considerada, compreendeu 7862 pontos nodais e 3827 elementos isoparamétricos triangulares com 6 pontos nodais, no modelo construído para o solo orgânico, e composta por 7838 pontos nodais e 3815 elementos isoparamétricos

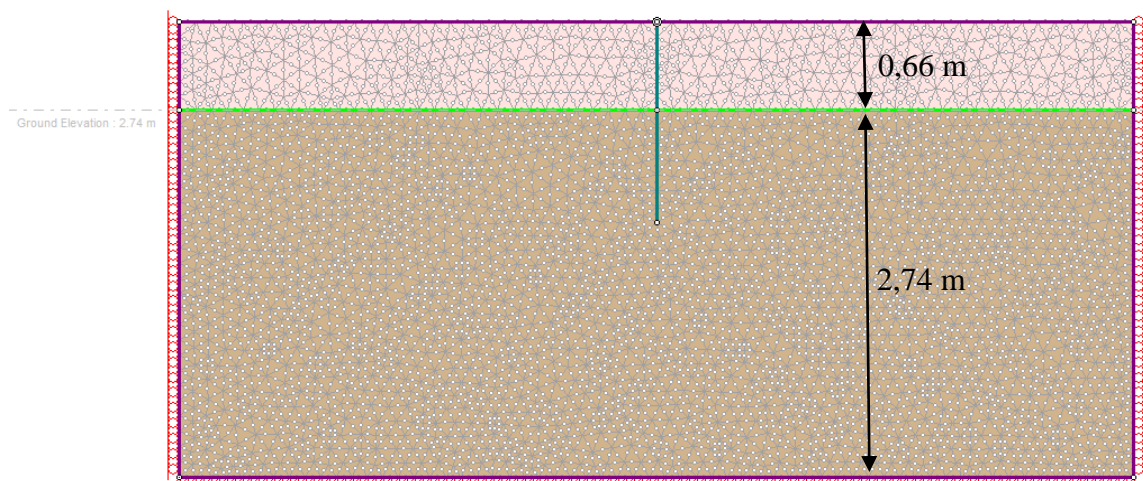
triangulares com 6 pontos nodais, no caso do modelo considerado para o solo residual inorgânico.

Quanto às condições fronteira, foram impedidos os deslocamentos horizontais nas fronteiras laterais, na base foram impedidos quaisquer deslocamentos e permitiram-se os deslocamentos de forma livre no topo.

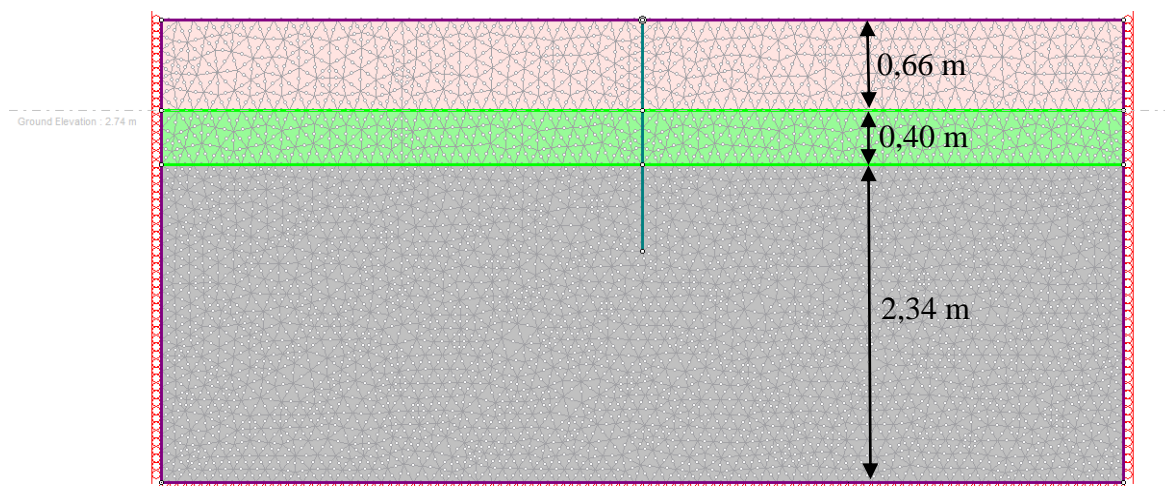
Seguidamente, definiram-se as propriedades do prumo bem como da interface entre o prumo e o solo, recorrendo-se ao comando *'Add Strtural Interface'*.

Quanto às propriedades do prumo, e considerando-se este como uma barra, atribuíram-se primeiramente as suas propriedades elásticas (Tabela 29) e seguidamente inseriram-se os parâmetros de resistência, considerando um comportamento plástico do material. Uma vez que o programa não permite a colocação da secção transversal do prumo, definiu-se uma espessura equivalente ($e_{equivalente}$) à do mesmo, cujo procedimento para a sua obtenção se encontra no Anexo C.

O passo seguinte consistiu na inserção do prumo no modelo, concluindo-se desta forma a fase de modelação do solo e do prumo. Na Figura 58, encontra-se o resultado final do modelo desenvolvido para cada tipo de solo.



a) Solo orgânico



a) Solo residual inorgânico

Figura 58 - Resultado da modelação do solo e prumo - RS² 9.0

5.1.2 Validação do modelo

Findo o processo de modelação executou-se uma validação do modelo realizado. Para tal, compararam-se os valores de tensões teoricamente esperados, calculados através das expressões 5 e 6, com as tensões verticais e horizontais obtidas pelo programa.

$$\sigma_v = \sum \gamma \times p \quad (5)$$

$$\sigma_H = K_0 \times \sigma_v \quad (6)$$

em que σ_v representa a tensão vertical, γ o peso volúmico do solo, p a profundidade, K_0 o coeficiente de impulso em repouso e σ_H a tensão horizontal.

Na Figura 59, encontram-se as curvas da evolução das tensões verticais em função da profundidade ($\sigma_v - p$) obtidas pelo programa e teoricamente, e na Figura 60 estão representadas as curvas da evolução das tensões horizontais em função da profundidade ($\sigma_H - p$).

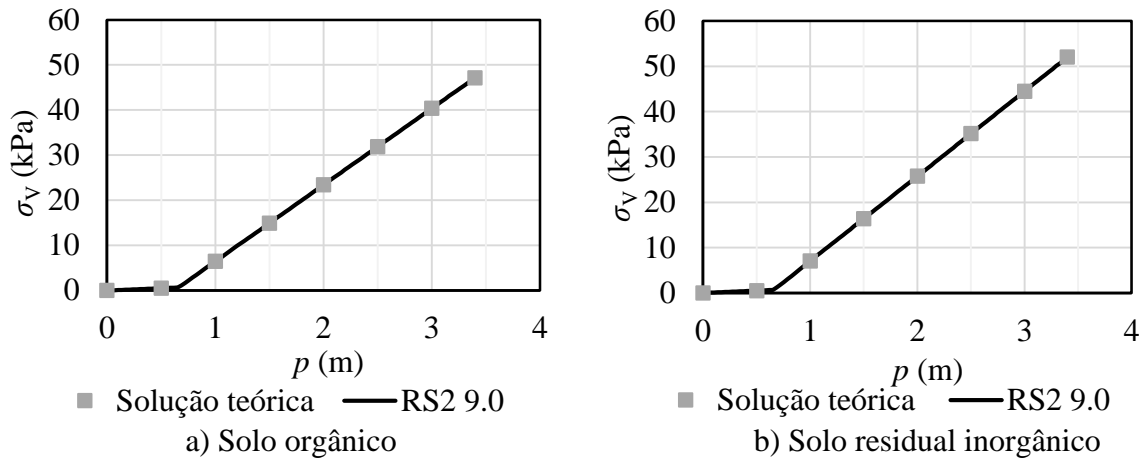


Figura 59 - Evolução da tensão vertical ao longo da profundidade (Solução teórica - RS² 9.0)

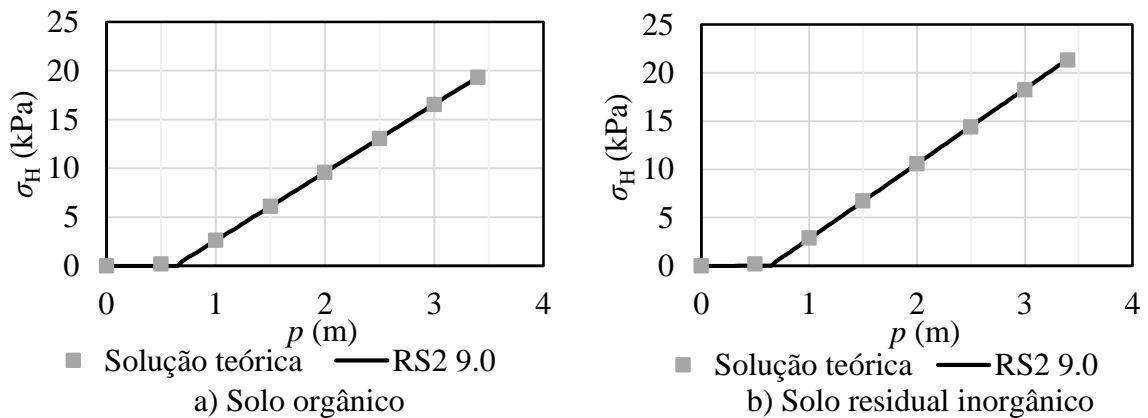


Figura 60 - Evolução da tensão horizontal ao longo da profundidade (Solução teórica - RS² 9.0)

Pela análise das Figura 59 e 60 concluiu-se que o modelo reproduz os estados de tensão previstos, pois os valores, quer de tensões verticais, quer das tensões horizontais obtidos pelo programa, são semelhantes aos valores calculados analiticamente.

5.1.3 Aplicação dos deslocamentos dinâmicos ao prumo

Depois de validado o modelo procedeu-se à análise dinâmica do sistema solo-prumo. O objetivo passou pela aplicação da resposta dinâmica obtida nos ensaios de colisão em termos de deslocamentos em função do tempo ($d-t$) ao prumo e posteriormente analisou-se o desempenho do sistema no programa.

Uma vez que durante a realização dos ensaios dinâmicos de colisão não foi possível registrar as leituras dos deslocamentos ao longo do tempo no topo do prumo, aplicou-se, no programa, de forma iterativa um deslocamento estático no topo do mesmo até se obter o deslocamento lido pelo sensor de posição na base do prumo, para esse instante. Obtido esse deslocamento foi possível calcular um fator empírico (f) que permitiu extrapolar os deslocamentos lidos na base para o topo.

Após este processo, foram criados diversos estágios aos quais se fizeram corresponder diferentes tempos e introduziu-se no programa a resposta dinâmica extrapolada em termos de deslocamentos em função do tempo (Figura 61 e 62).

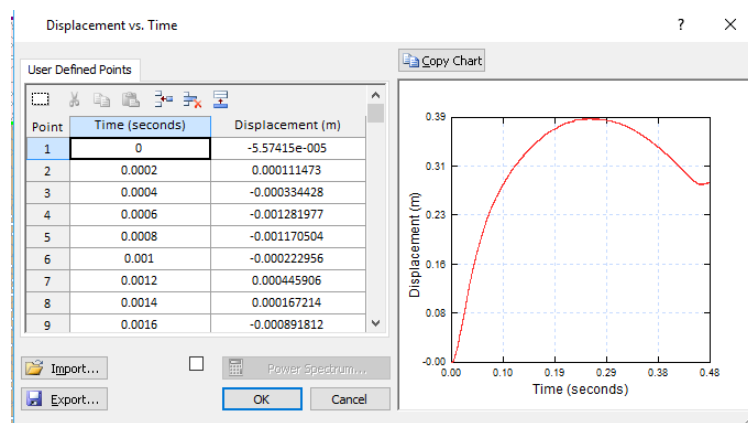


Figura 61 - Introdução da resposta dinâmica ($d-t$) do prumo P₀₃ no programa - RS² 9.0

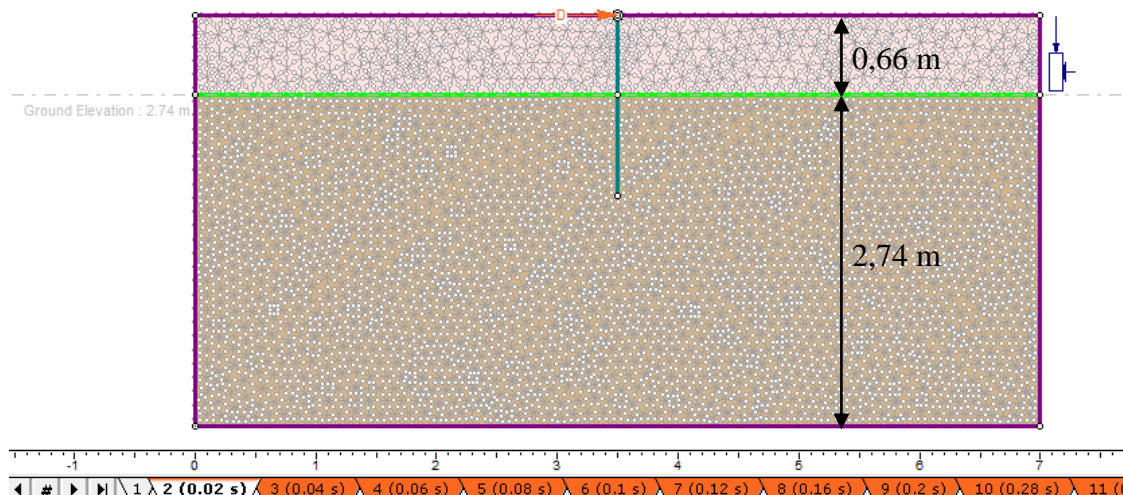


Figura 62 - Aplicação da resposta dinâmica ($d-t$) do prumo P₀₃ no programa - RS² 9.0

5.1.4 Apresentação e análise de resultados

Apesar dos vários ensaios realizados, apenas foram considerados na análise numérica dois prumos cravados no solo orgânico a diferentes profundidades (i.e., P_{O3} e P_{O5}) e um prumo cravado a 1040 mm no solo residual inorgânico (i.e., P_{I1}). Foram selecionados estes prumos com o objetivo de analisar no programa a influência do tipo de solo e da profundidade de cravação. Na Tabela 30 encontram-se os prumos considerados para a realização da análise numérica.

Tabela 30 - Prumos considerados para a realização da análise numérica

| Prumo | Solo | Profundidade de cravação (mm) | E |
|-----------------|---------------------|-------------------------------|------|
| P _{O3} | Orgânico | 840 | 2834 |
| P _{O5} | | 1040 | 4949 |
| P _{I1} | Residual Inorgânico | 1040 | 4700 |

P_{O3} - Prumo cravado no solo orgânico a 840 mm

Depois de calculado o modelo verificou-se a compatibilidade entre a resposta, em termos de deslocamentos, imposta no programa e a obtida experimentalmente. Na Figura 63, é possível visualizar-se o resultado dessa comparação.

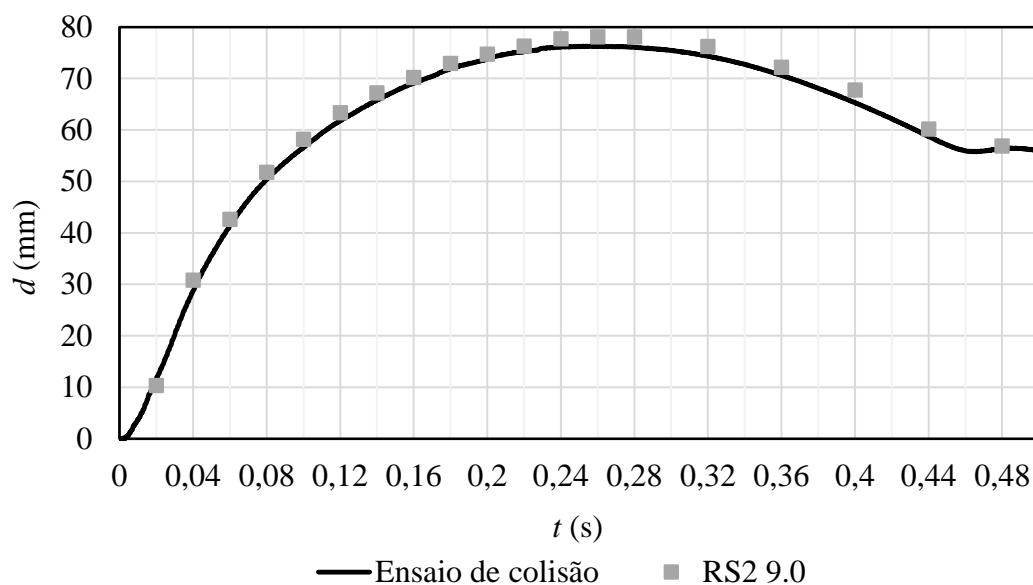


Figura 63 - Comparação dos deslocamentos impostos no programa RS² 9.0 com os obtidos nos ensaios dinâmicos de colisão para o prumo P_{O3}

Da análise da Figura 63 é possível verificar que existiu conformidade entre as respostas obtidas, numérica e experimentalmente, tal como seria de esperar, pois a resposta em termos de deslocamentos foi imposta no programa.

Uma vez verificada a concordância entre os deslocamentos, analisou-se se esta também existia em termos de força em função do tempo ($F-t$) (Figura 64).

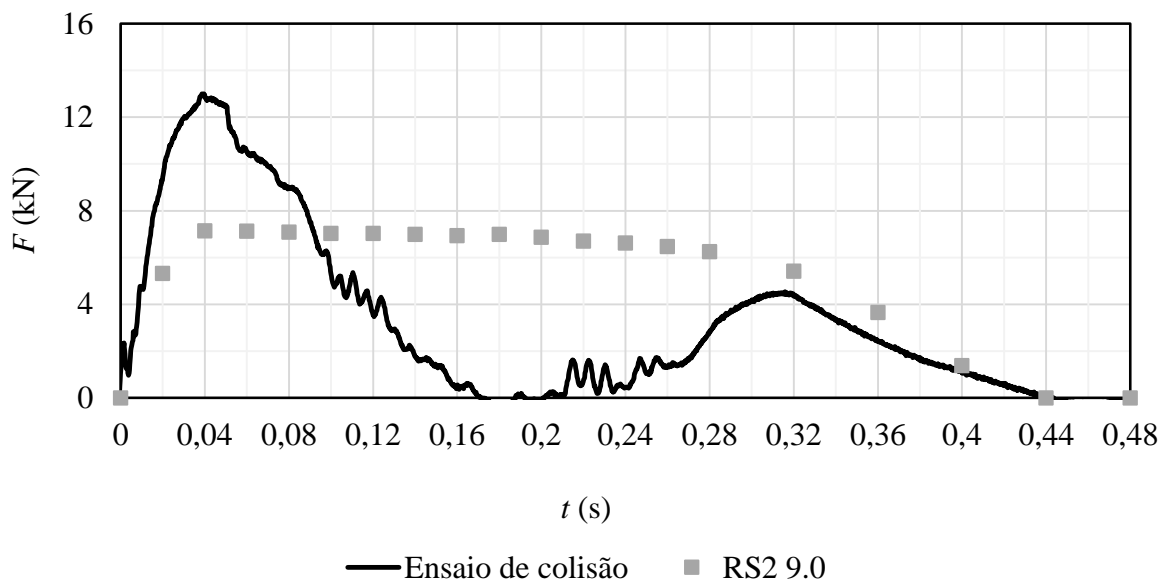


Figura 64 - Comparação da força em função do tempo ($F-t$) obtida pelo programa RS² 9.0 com a obtida no ensaio dinâmico de colisão ao prumo P₀₃

Da análise da Figura 64 é possível verificar que a curva obtida pelo programa possui um comportamento elástico linear até atingir uma força máxima de aproximadamente 7 kN aos $t = 0,04$ s, correspondendo à força que provoca o início da plastificação do aço do prumo. A partir desse instante observa-se a existência de um patamar de força ao longo do tempo que termina a partir do momento em que os deslocamentos, depois de atingirem o máximo ($t = 0,26$ s, Figura 63), começam a diminuir.

Comparando estes resultados com os obtidos experimentalmente verifica-se uma evidente diferença entre os dois comportamentos. No caso da curva experimental, observa-se um pico de força seguido de um decréscimo ao longo do tempo da mesma, ao contrário do que se sucedeu na curva obtida pelo programa, que não atingiu um pico de força, mas sim um patamar.

Para além disso a força máxima registada pelo programa foi cerca de metade da verificada experimentalmente.

Seguidamente, observou-se no programa a evolução das zonas de plastificação do solo e do prumo ao longo do tempo (Figura 65).

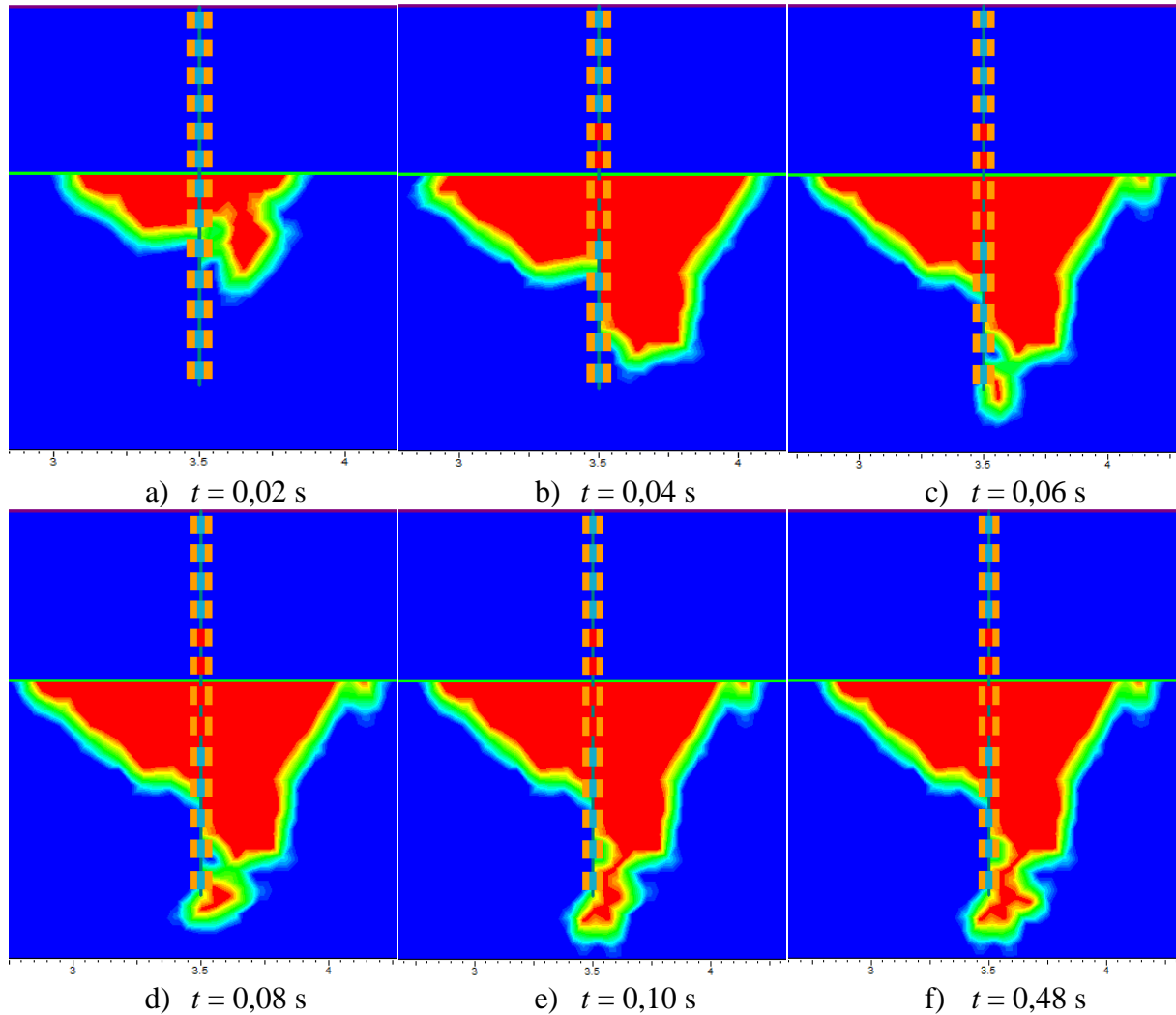


Figura 65 - Evolução das zonas de plastificação no terreno e no prumo P₀₃ - RS² 9.0

Analisando a Figura 65 observa-se que no instante $t = 0,02$ s após o impacto, já se verificava alguma plastificação nas proximidades da superfície do solo. No instante $t = 0,04$ s verifica-se a plastificação do prumo junto da superfície do solo e conjuntamente observa-se um aumento da área de plastificação do solo em largura e em profundidade. A partir do instante $t = 0,06$ s e até ao instante final, denota-se que o solo existente próximo da extremidade cravada do prumo plastificou.

Depois de obtidas e analisadas as zonas de plastificação do sistema ao longo do tempo, retiraram-se do programa as deformadas do sistema solo-prumo correspondentes aos instantes considerados mais relevantes (Figura 66).

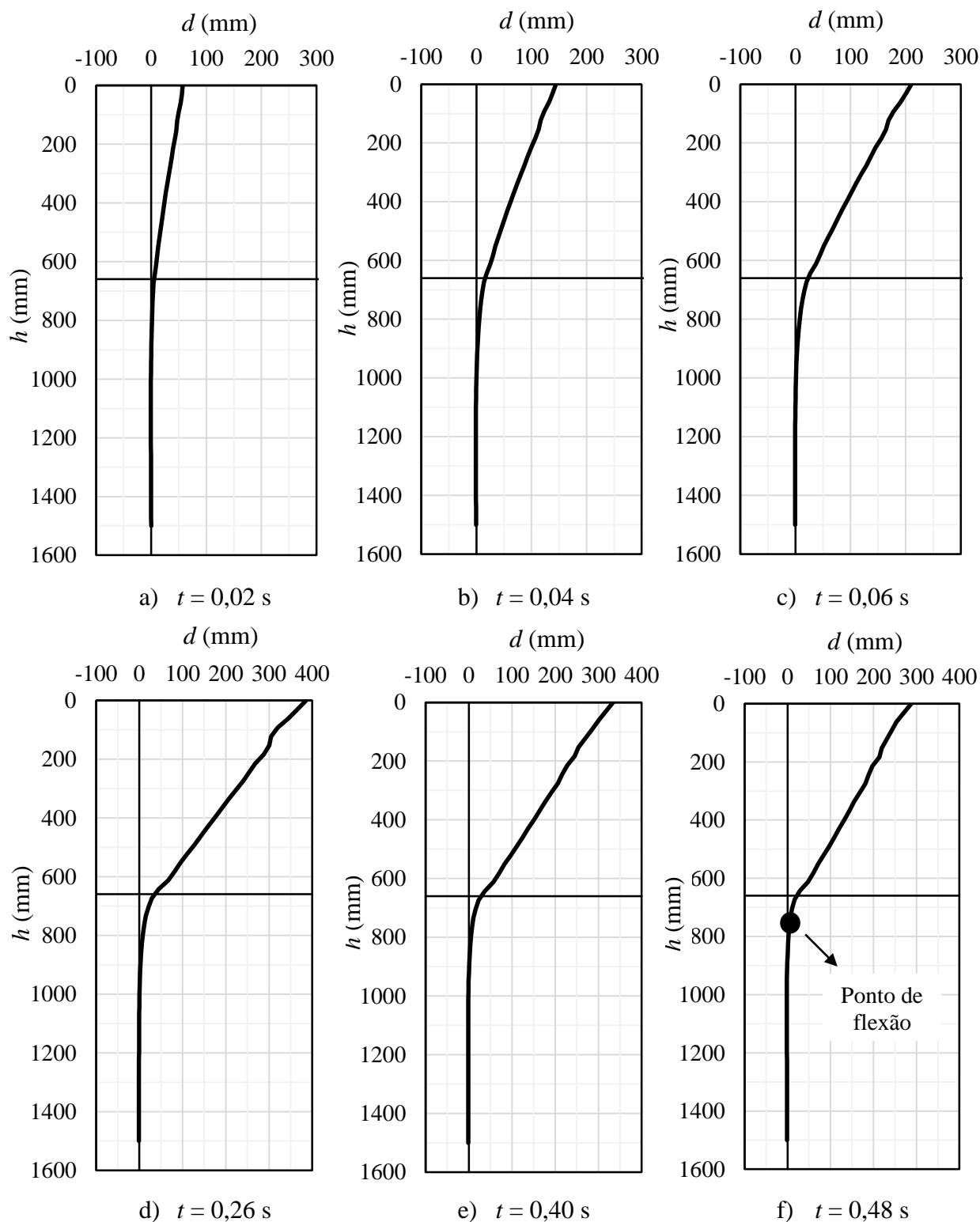


Figura 66 - Evolução da deformada do prumo P₀₃ ao longo do tempo - RS² 9.0

Com a obtenção destas curvas foi possível, não só observar-se os deslocamentos impostos no prumo ao longo do tempo, mas também obter-se a resposta do sistema em termos de deslocamentos em profundidade, permitindo desta forma avaliar-se a influência da profundidade de cravação do prumo, o que não é possível saber-se através dos ensaios experimentais.

Da análise da curva obtida para o instante $t = 0,02$ s verifica-se a existência de um comportamento elástico do prumo, tal como o também observado na Figura 65a. Observando a curva referente ao instante $t = 0,04$ s, instante em que a força máxima é atingida, verifica-se que é neste que se dá a plastificação do prumo. Ao instante $t = 0,26$ s é atingindo o deslocamento máximo de 390 mm e a partir deste dá-se a recuperação do sistema que se traduz numa diminuição dos deslocamentos, que no instante final foram de 290 mm.

Na Figura 67 é realizada uma comparação entre os deslocamentos finais do sistema obtidos *in situ* e os deslocamentos observados no instante final $t = 0,48$ s obtidos através do programa RS² 9.0.

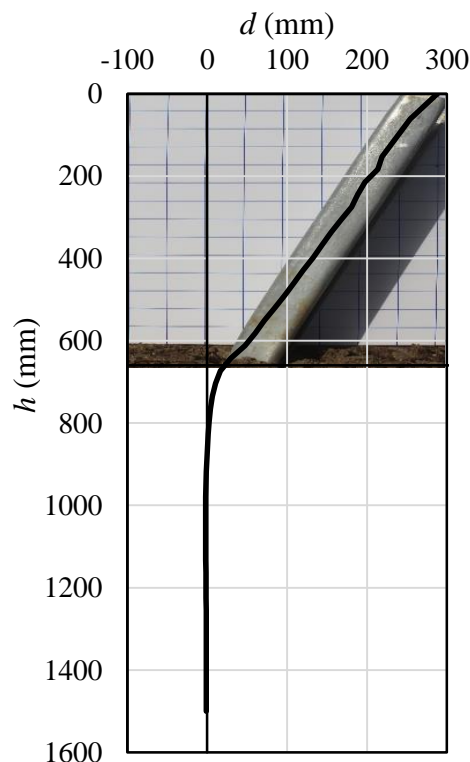


Figura 67 - Comparação do deslocamento final do sistema obtido com recurso ao programa RS² 9.0 com o verificado *in situ* no prumo P₀₃

Através da análise da Figura 67, verifica-se que o deslocamento obtido pelo programa RS² 9.0 foi ligeiramente superior ao verificado *in situ* (i.e., 290 mm e 250 mm, respetivamente). Quanto ao deslocamento do solo na base do prumo constata-se que *in situ* este valor seria cerca de 50 mm e que através do programa seria de 29 mm.

Comparando o ponto de flexão do prumo situado abaixo da superfície do solo, verifica-se que existe compatibilidade entre os valores obtidos no programa e o verificado *in situ*, isto é, em ambos se situa a cerca de 110 mm abaixo da superfície do solo.

P_{O5} - Prumo cravado no solo orgânico a 1040 mm

Relativamente ao prumo P_{O5}, do mesmo modo que no prumo anterior, começou-se por comparar a resposta obtida pelo programa com a obtida experimentalmente em termos de deslocamentos em função do tempo ($d-t$), estando os resultados representados na Figura 68. Na mesma é possível observar que existiu compatibilidade dos deslocamentos na base do prumo entre o programa RS² 9.0 e os obtidos aquando a realização do ensaio de colisão.

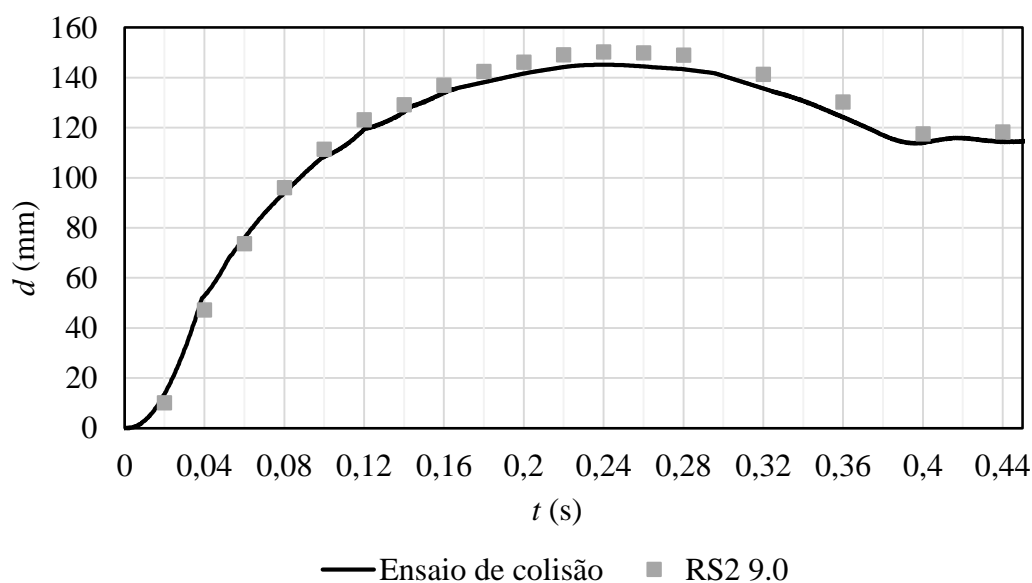


Figura 68 - Comparação dos deslocamentos impostos no programa RS² 9.0 com os obtidos nos ensaios dinâmicos de colisão para o prumo P_{O5}

Os resultados em termos de força em função do tempo ($F-t$) do ensaio de colisão encontram-se comparados com os obtidos no programa na Figura 69.

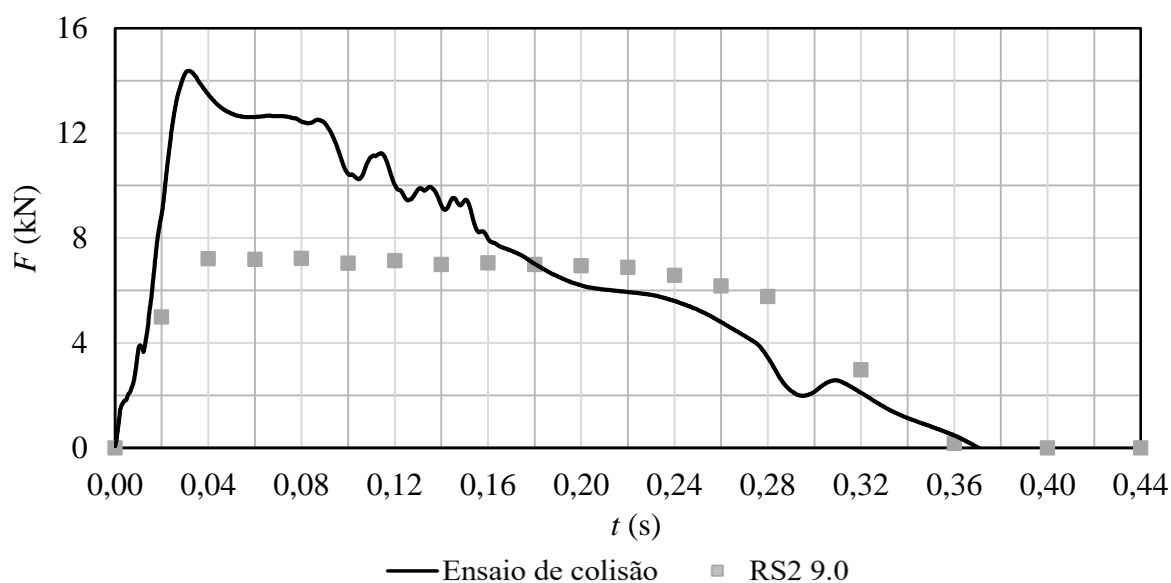


Figura 69 - Comparação da força em função do tempo ($F-t$) obtida pelo programa RS² 9.0 com a obtida no ensaio dinâmico de colisão ao prumo P₀₅

Da análise da Figura 69 verifica-se uma resposta do programa é em tudo idêntica à obtida no do prumo P₀₃, verificando-se, uma vez mais, um ramo elástico linear até aos $t = 0,04$ s, e nesse mesmo momento é atingida a cedência do aço, observando-se a partir desse instante a existência de um patamar de força, correspondente à deformação plástica do prumo ao longo do tempo. Nos instantes finais verifica-se uma diminuição da força até ocorrer a sua completa dissipação à medida que se dá a recuperação de parte do estado inicial do sistema.

Comparando os resultados obtidos pelo programa com os registados experimentalmente verificou-se que nos primeiros não se obteve um pico de força ao contrário do que se observou nos resultados experimentais e para além disto, a força máxima verificada no sistema pelo programa foi cerca de metade da registada experimentalmente, existindo, contudo, compatibilidade nos instantes iniciais (i.e., até ao $t = 0,04$ s) e nos instantes finais em ambas as curvas.

Relativamente à evolução das zonas de plastificação do solo e do prumo ao longo do tempo, são mostradas para os instantes considerados mais relevantes na Figura 70.

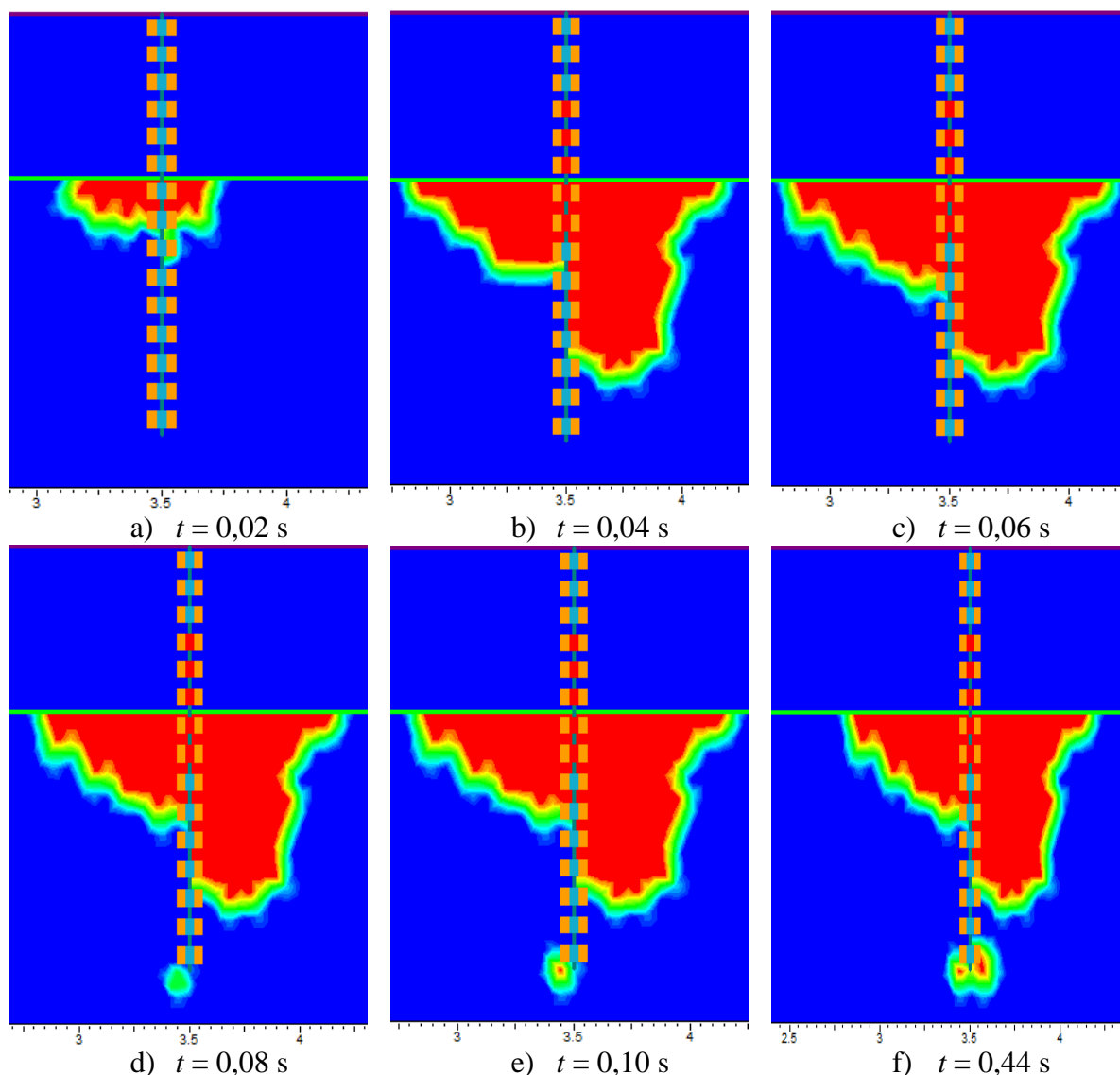


Figura 70 - Evolução das zonas de plastificação no terreno e no prumo P₀₅ - RS² 9.0

Analisando a Figura 70 verifica-se que no instante $t = 0,02$ s apenas ocorreu plastificação do solo numa camada superficial e circundante ao prumo. Comparando esta com a obtida no prumo P₀₃ (Figura 65a) para este instante, observa-se que a área de plastificação é bastante menor, embora se tenha realizado o ensaio com uma energia de impacto superior. Este fato poderá ser justificado pelo comprimento de cravação deste prumo ser superior ao do prumo P₀₃.

No instante $t = 0,04$ s verifica-se um grande aumento na área de cedência do solo e, para além disso, observa-se também a plastificação do prumo. Nos instantes seguintes não se observaram grandes diferenças na zona de plastificação do solo mantendo-se esta praticamente inalterada até ao instante final (i.e., $t = 0,44$ s). Comparando a área de plastificação final deste prumo com a obtida no prumo P₀₃ (Figura 65f), verifica-se que estas são muito idênticas, embora o ensaio

P_{O5} tenha decorrido a uma energia superior, aproximadamente o dobro, (i.e., $E_{(P_{O3})} = 2834$ J e $E_{(P_{O5})} = 4949$ J), o que demonstra que poderá existir alguma influência positiva quando se aumenta a profundidade de cravação no desempenho do sistema solo-prumo. Na Figura 71 é possível visualizar-se a evolução da deformada do sistema ao longo do tempo.

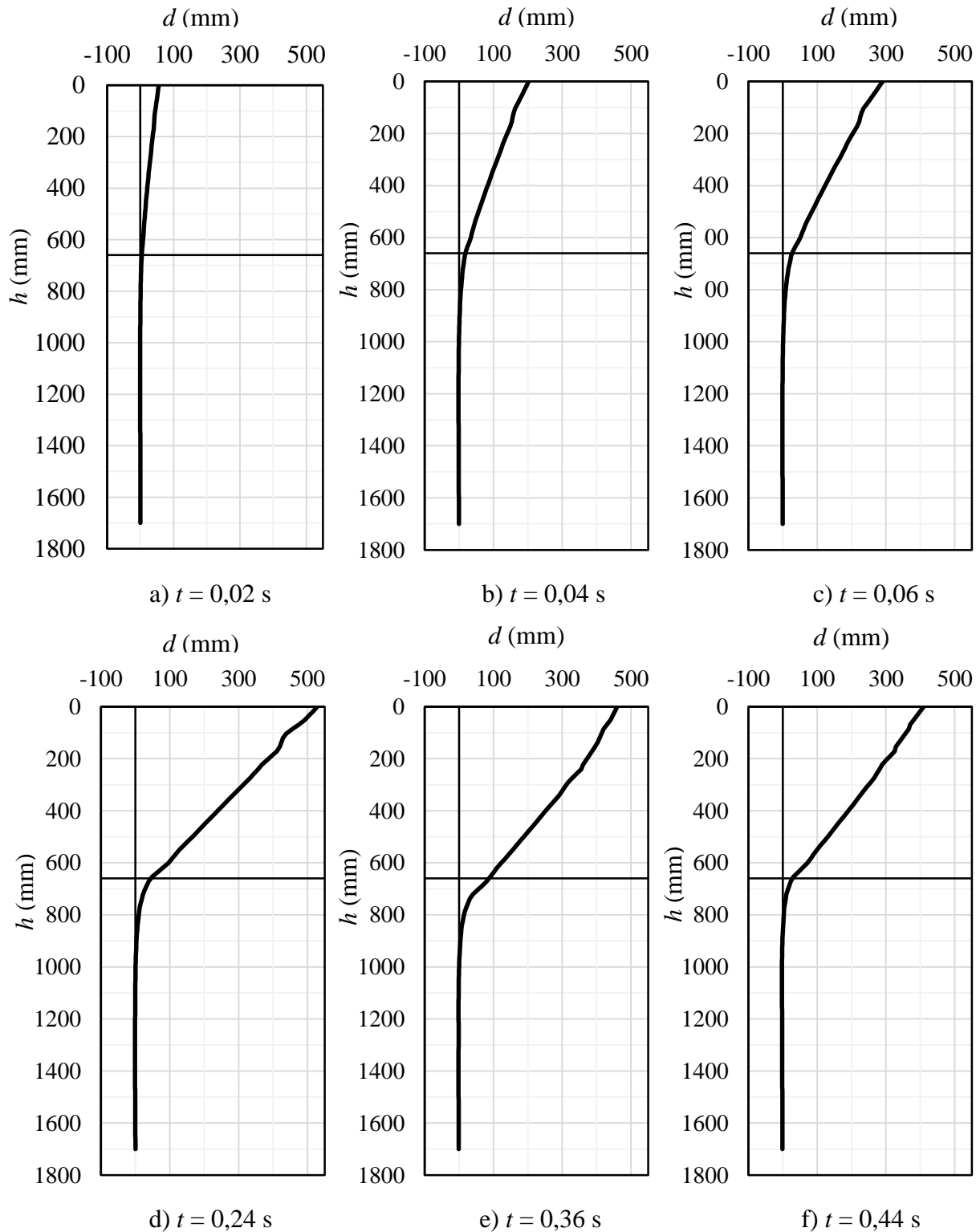


Figura 71 - Evolução da deformada do prumo P_{O5} ao longo do tempo - RS² 9.0

Analisando o instante $t = 0,02$ s verifica-se que o prumo deforma-se elasticamente. Já no instante $t = 0,04$ s observa-se que se dá a plastificação do prumo, tal como o observado na Figura 70b e que o ponto de flexão do mesmo se dá abaixo da superfície do solo.

Nos instantes seguintes, verifica-se um aumento do deslocamento até se atingir o deslocamento máximo no topo de 550 mm aos $t = 0,24$ s. A partir desse instante, o sistema recupera parte da sua deformação até estabilizar para um deslocamento máximo no topo do prumo de 380 mm aos $t = 0,44$ s.

Comparando os deslocamentos deste sistema com os obtidos no prumo P₀₃ verifica-se que neste foram observados maiores deslocamentos no topo do prumo, quer durante o ensaio, quer no seu final. Visto que os ensaios foram realizados com diferentes energias não é possível tecer conclusões acerca da influência da profundidade de cravação com estas deformadas.

Na Figura 72 encontra-se representada a comparação entre os deslocamentos no final do ensaio dinâmico de colisão verificados *in situ* e os verificados com recurso ao programa RS² 9.0.

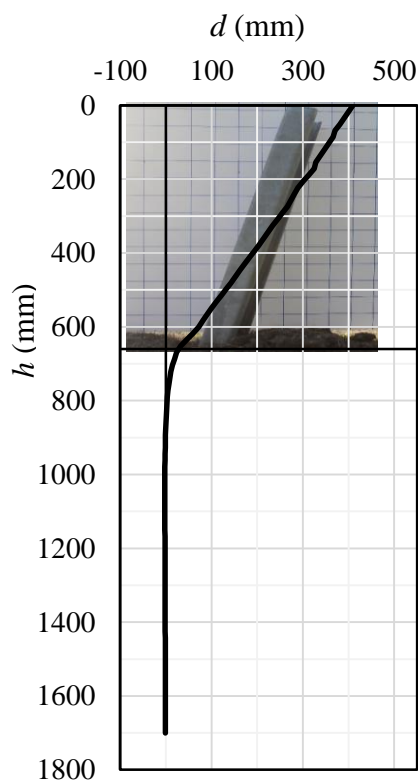


Figura 72 - Comparação do deslocamento final do sistema obtido com recurso ao programa RS² 9.0 com o verificado *in situ* no prumo P₀₅

Analisando o deslocamento final no topo do prumo verifica-se que *in situ* se obteve um menor valor de deslocamento final (i.e., 260 mm experimentalmente e 380 mm no programa) o que demonstra que para este prumo a resposta obtida pelo programa esteve um pouco afastada do que se esperaria. Tal poderá ser justificado pelo fato de as propriedades do solo introduzidas no programa poderem não corresponder às existentes *in situ*.

Também relativamente ao ponto de flexão não se verificou compatibilidade entre os resultados, pois *in situ* foi medido que este ponto se encontrava 155 mm abaixo da superfície do solo e através do programa verificou-se que este se localizava a 95 mm.

Ao nível do deslocamento observado na superfície do solo verificou-se que, mais uma vez, não existiu conformidade nos resultados uma vez que *in situ* se registou um valor de 40 mm e através do programa obteve-se um valor de cerca de 20 mm de deslocamento.

P₁₁ - Prumo cravado no solo residual inorgânico a 1040 mm

Quanto ao prumo P₁₁, cravado no solo residual inorgânico, mais uma vez, através da Figura 73, é demonstrada a uniformidade entre os deslocamentos lidos na base do prumo pelo sensor e os impostos no programa.

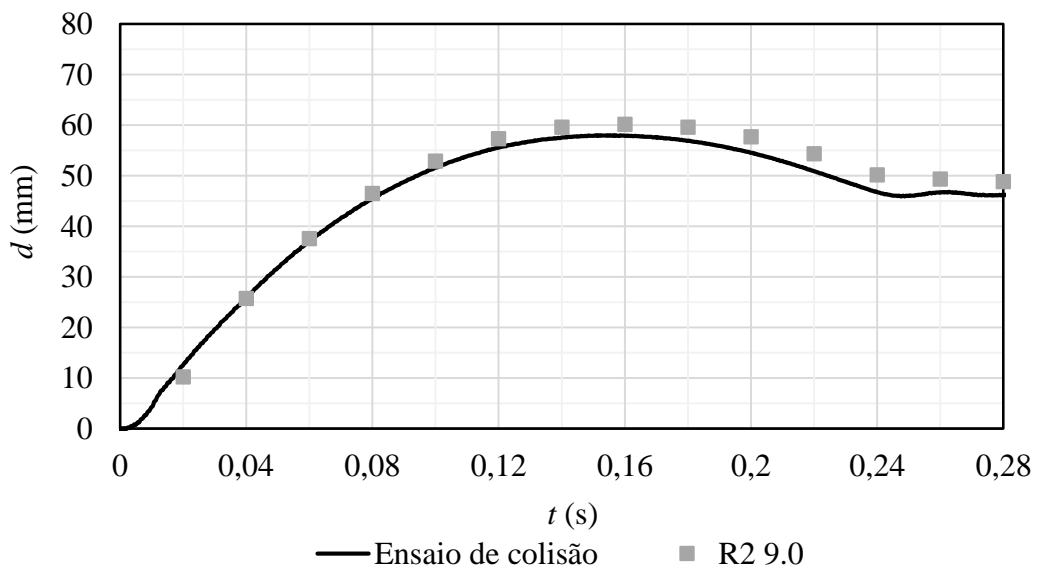


Figura 73 - Comparação dos deslocamentos impostos no programa RS² 9.0 com os obtidos nos ensaios dinâmicos de colisão para o prumo P₁₁

Na Figura 74 encontra-se comparada a resposta em termos de força em função do tempo obtida pelo programa e a registada *in situ* para este ensaio.

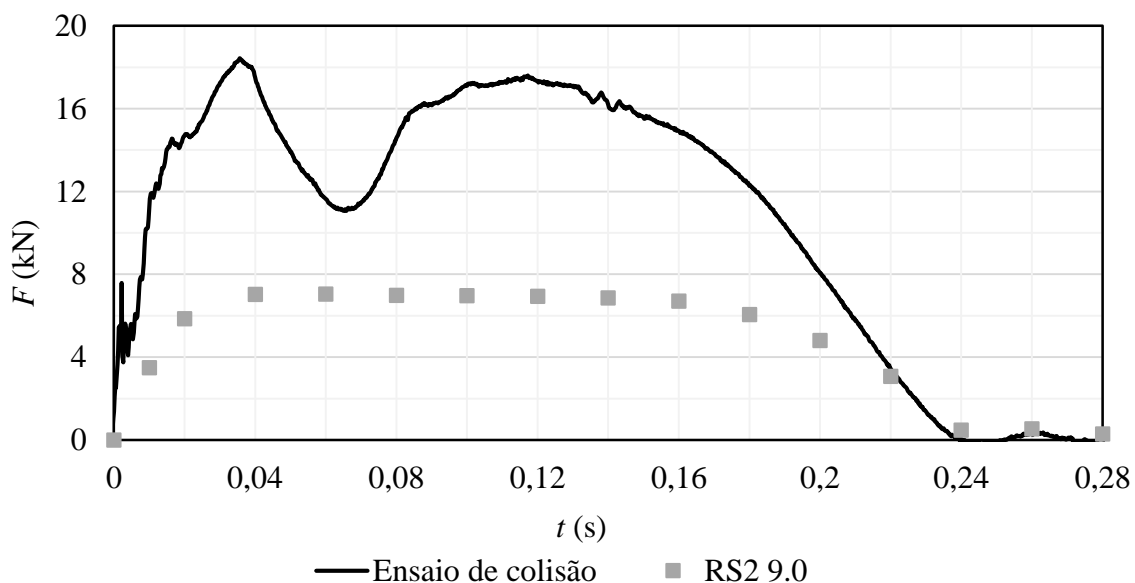


Figura 74 - Comparação da força em função do tempo ($F-t$) obtida pelo programa RS² 9.0 com a obtida no ensaio dinâmico de colisão ao prumo P₁₁

Analisando a resposta obtida pelo programa em termos de forças para os instantes de tempo considerados verifica-se um comportamento semelhante ao observado nos dois prumos anteriores.

Neste caso, a resposta obtida através da realização do ensaio de colisão possui um comportamento mais parecido com o obtido pelo programa, pois existe um pico de força, mas depois deste esta mantém-se constante durante um certo período de tempo e só depois se vai dissipando, aproximando-se assim do comportamento obtido no programa RS² 9.0.

A principal diferença entre as duas curvas reside na sua proporção, pois a curva obtida pelo programa é 2,3 vezes inferior à obtida experimentalmente.

A evolução das zonas de plastificação do solo e do prumo ao longo do tempo encontra-se representada na Figura 75.

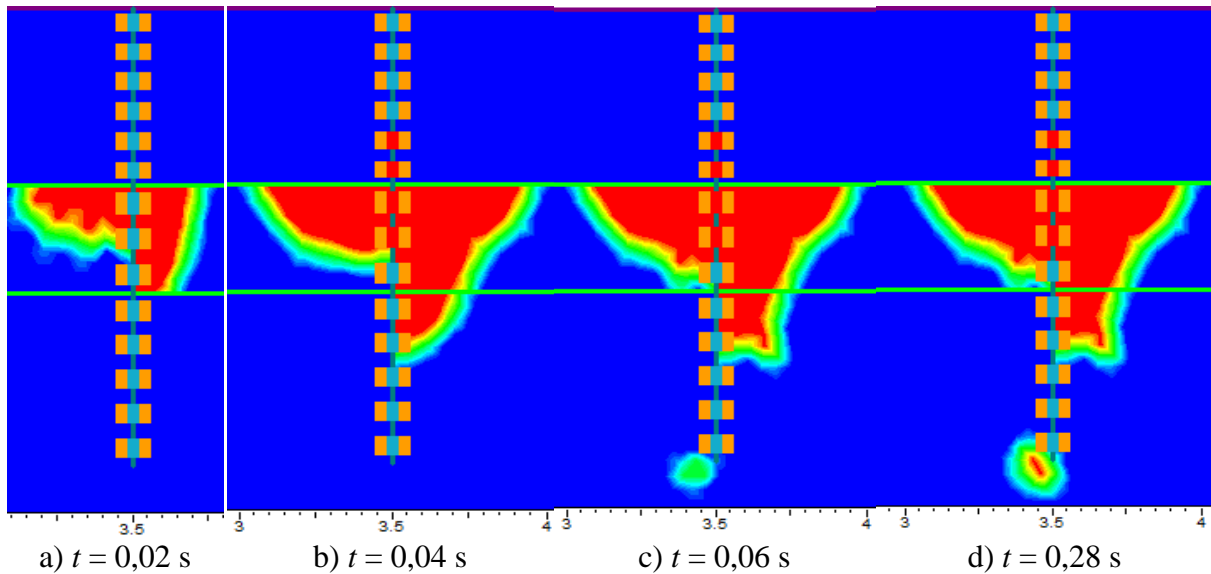


Figura 75 - Evolução das zonas de plastificação no terreno e no prumo P₁₁ - RS² 9.0

Pela análise da Figura 75a, correspondente ao instante $t = 0,02$ s, apenas se verificou ocorrência de plastificação da área de solo adjacente ao prumo sendo esta apenas observada na primeira camada do solo existente no solo residual inorgânico. No instante $t = 0,04$ s, verifica-se a plastificação do prumo e o alargamento da zona de plastificação do solo, mantendo-se essa zona semelhante ao longo e até ao final do ensaio.

Analisando a zona de plastificação do solo para o instante final (i.e., $t = 0,28$ s) verifica-se que esta comparativamente à obtida para o prumo P₀₅, cravado a uma mesma profundidade (i.e., 1040 mm), ensaiado com uma energia de impacto semelhante, mas em solos de características de resistência distinta, é menor que a verificada no prumo P₀₅. Assim se comprova que a área de plastificação do solo depende das suas características de resistência e com isso o desempenho do sistema solo-prumo é influenciado.

A evolução da deformada do prumo ao longo do tempo, obtida pelo programa, é apresentada na Figura 76.

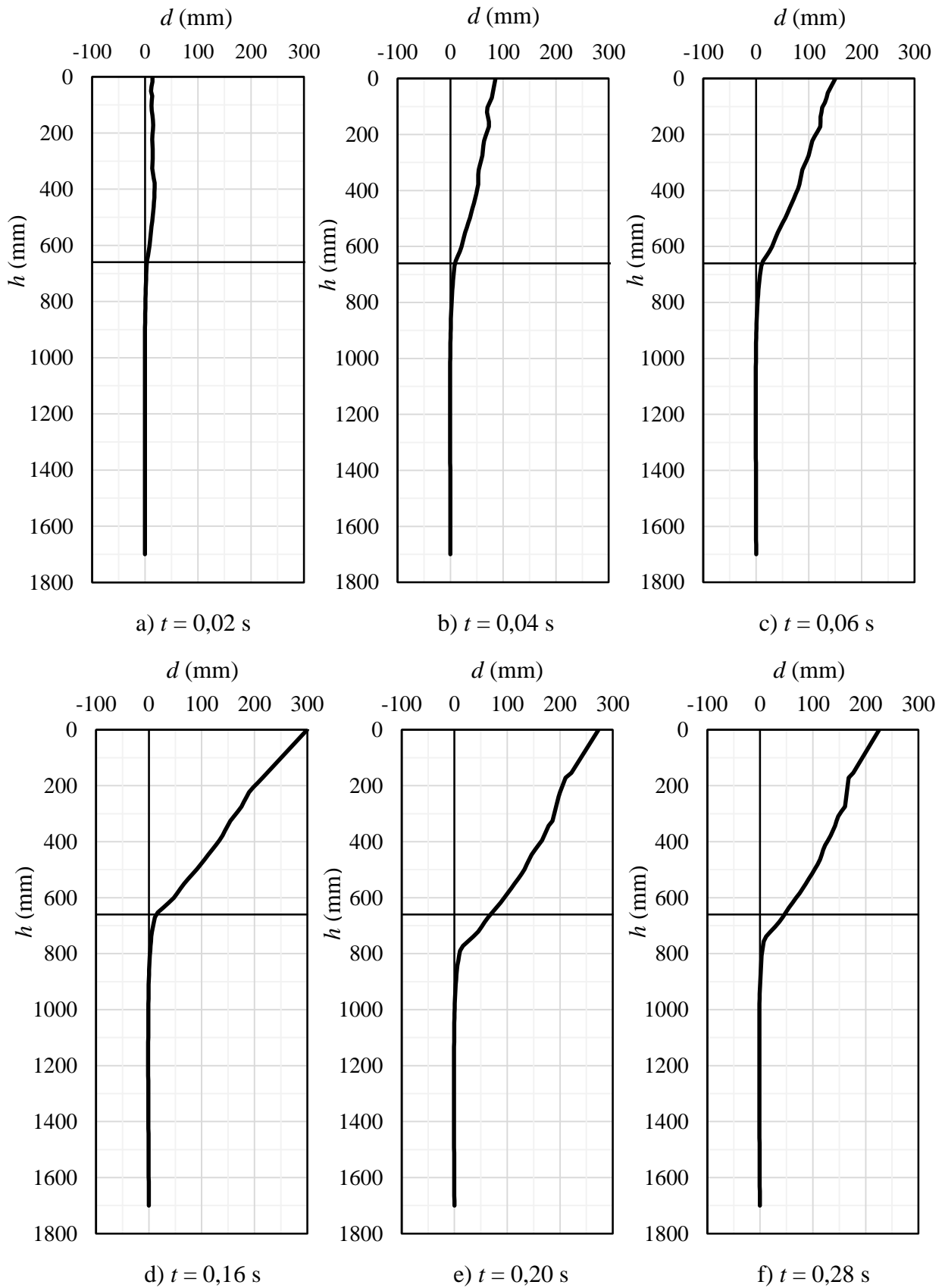


Figura 76 - Evolução da deformada do prumo P_{II} ao longo do tempo - RS² 9.0

De modo geral o comportamento deste sistema ocorreu de forma similar ao já verificado nos dois prumos anteriores. De salientar que neste caso o deslocamento máximo verificado foi de 300 mm no instante $t = 0,16$ s e o deslocamento final de 225 mm aos $t = 0,28$ s.

Comparando estes deslocamentos com os obtidos no prumo P₀₅, em que a diferença entre ensaios apenas residiu no tipo de solo em que os prumos foram ensaiados, observa-se que os deslocamentos foram cerca de metade quer no deslocamento máximo, quer no deslocamento final verificado, demonstrando desta forma que a resistência do solo é um fator determinante no desempenho do sistema solo-prumo.

Na Figura 77 encontra-se representada a comparação entre os deslocamentos finais observados *in situ* e os deslocamentos finais obtidos no programa.

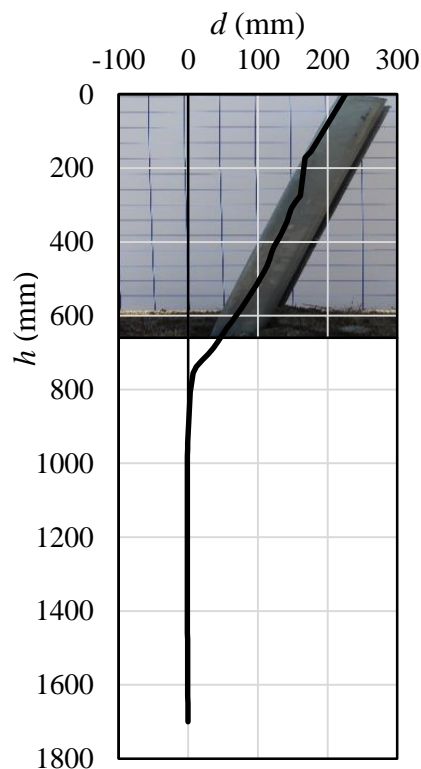


Figura 77 - Comparação do deslocamento final do sistema obtido com recurso ao programa RS² 9.0 com o verificado *in situ* no prumo P₁₁

Da análise da Figura 77 observa-se que existiu compatibilidade entre os deslocamentos finais no topo do prumo obtidos *in situ* (i.e., 220 mm) e no programa (i.e., 225 mm). Verifica-se também que o ponto de flexão do prumo foi cerca de 80 mm abaixo do nível da superfície do

solo quer pelo programa quer pelo verificado *in situ* e quanto ao deslocamento observado na superfície do solo também se verificou compatibilidade entre os resultados, obtendo-se para esse deslocamento um valor de 50 mm para ambos os casos.

5.2 Análise numérica tridimensional (RS³ 1.0)

O programa RS³ 1.0 é uma ferramenta 3D produzida pela Rocsciense. Este programa permite, com recurso ao método de elementos finitos, a análise de estruturas geotécnicas para aplicações civis, podendo ser utilizado numa ampla gama de aplicações, desde escavações subterrâneas e à superfície, concepção de túneis e suportes, projeto de fundações, taludes, consolidação e até análise de percolação (Sarithchandran, 2014).

5.2.1 Modelação do maciço terroso e do prumo

Começou-se por definir os limites externos do maciço no programa, tendo sido necessário também definir-se o seu desenvolvimento perpendicularmente ao plano xy . Admitiu-se um desenvolvimento de 7,0 metros, ficando o maciço delimitado pelas dimensões de 7,0 m \times 3,4 m \times 7,0 m.

Seguidamente, e assim como o realizado no programa RS² 9.0 definiram-se os limites entre os materiais existentes no modelo e de seguida introduziram-se as propriedades dos solos considerados em cada estrato.

Definiram-se as propriedades do prumo, considerando que este seria do tipo viga. Devido à tridimensionalidade do modelo foi necessário introduzir-se a inércia segundo os seus dois eixos principais (i.e., I_x e I_z). Para se modelar o prumo utilizou-se a função ‘*Add Pile Pattern*’.

Na Figura 78 pode-se observar o resultado da inserção do prumo nos dois modelos realizados para cada solo considerado no estudo.

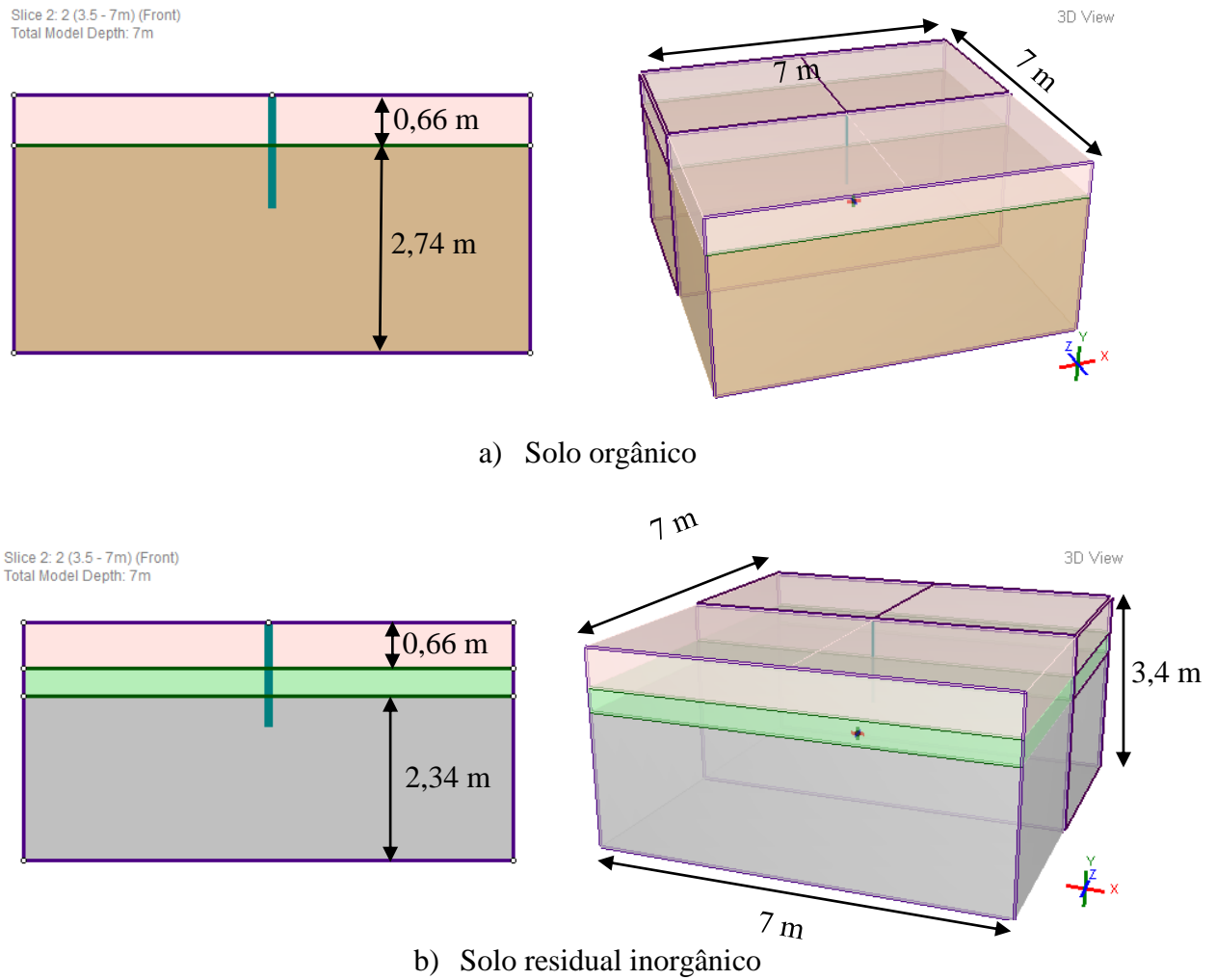


Figura 78 - Resultado da inserção do prumo no maciço - RS³1.0

O procedimento para a definição das condições fronteira foi idêntico ao executado no programa RS² 9.0. No entanto, neste foi necessário restringir os deslocamentos horizontais na direção z (Figura 79).

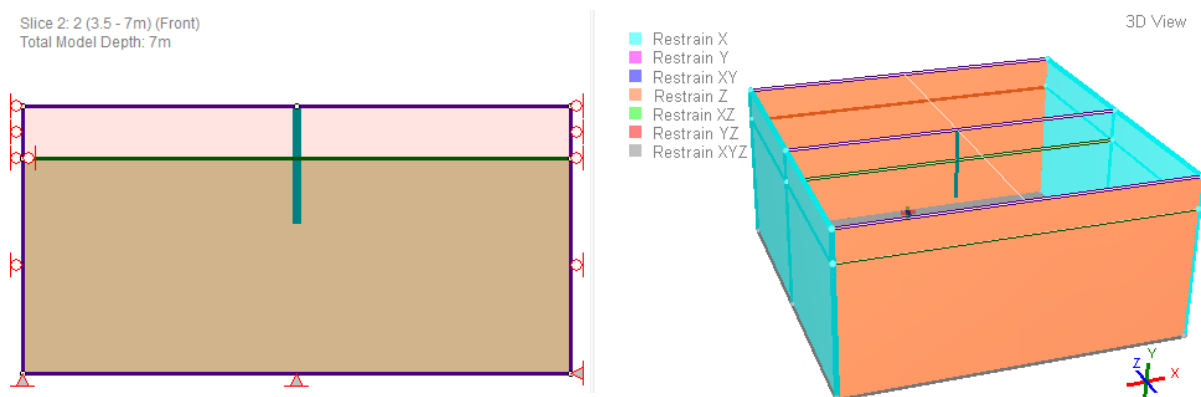
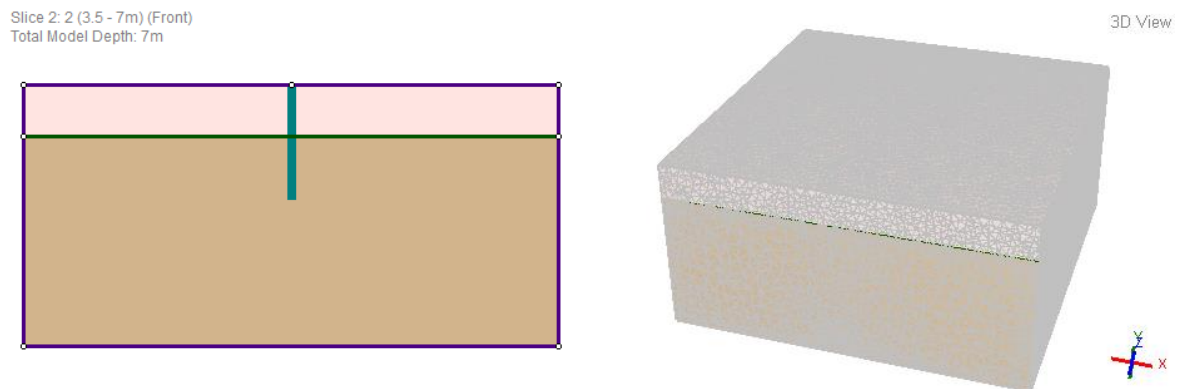
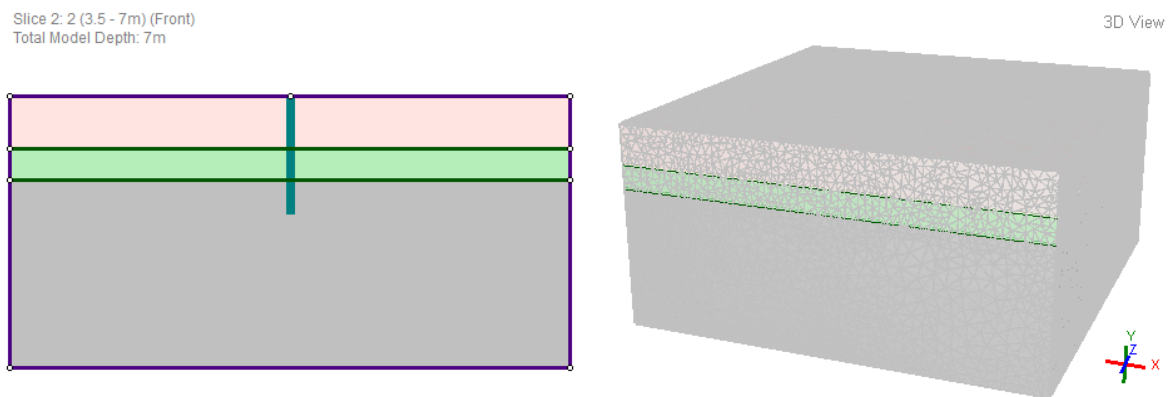


Figura 79 - Resultado da aplicação das condições fronteira ao modelo de elementos finitos - RS³ 1.0

O passo seguinte para a elaboração do modelo consistiu na definição da malha de elementos finitos a utilizar. Esta é composta por 41351 pontos nodais e 227037 elementos isoparamétricos tetraédricos com 4 pontos nodais, no caso do modelo construído para o solo orgânico (Figura 80a), e composta por 48338 pontos nodais e 269858 elementos isoparamétricos tetraédricos com 4 pontos nodais, no caso do modelo considerado para o solo residual inorgânico (Figura 80b).



a) Solo orgânico



b) Solo residual inorgânico

Figura 80 - Resultado da definição da malha de elementos finitos - RS³ 1.0

A última etapa executada antes de se realizar a validação do modelo foi a definição do estado de tensão *in situ*. Para isso, consideraram-se as mesmas características utilizadas no modelo bidimensional.

5.2.2 Validação do modelo

Tal como o executado no programa RS² 9.0, após a realização do modelo procedeu-se à sua validação. Na Figura 81 e 82, encontra-se a evolução das tensões verticais e horizontais em função da profundidade obtidas pelo programa, comparadas com a solução teórica.

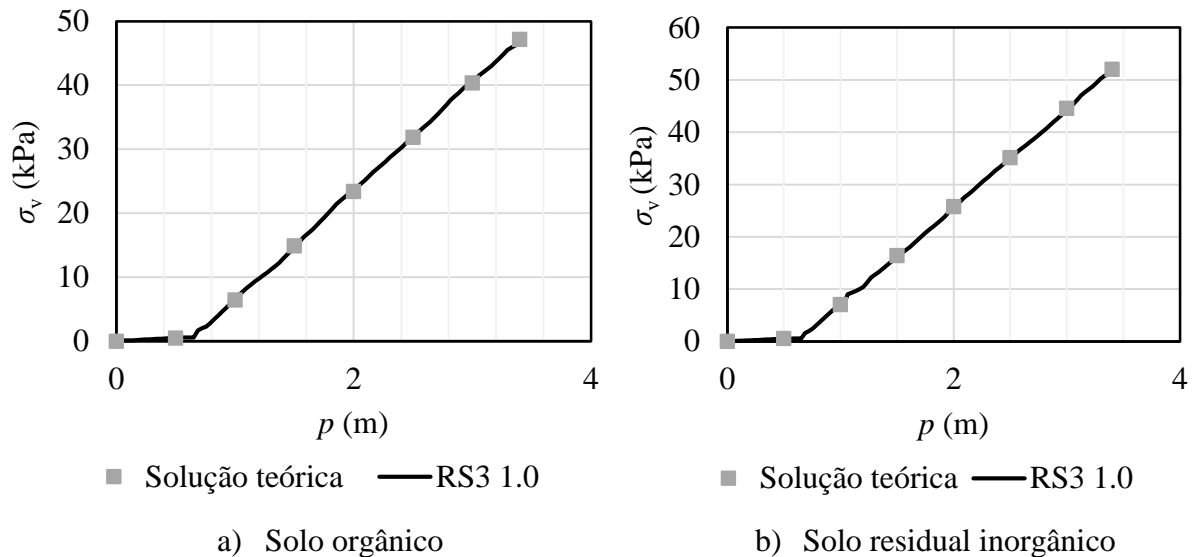


Figura 81 - Evolução da tensão vertical ao longo da profundidade (Solução teórica - RS³ 1.0)

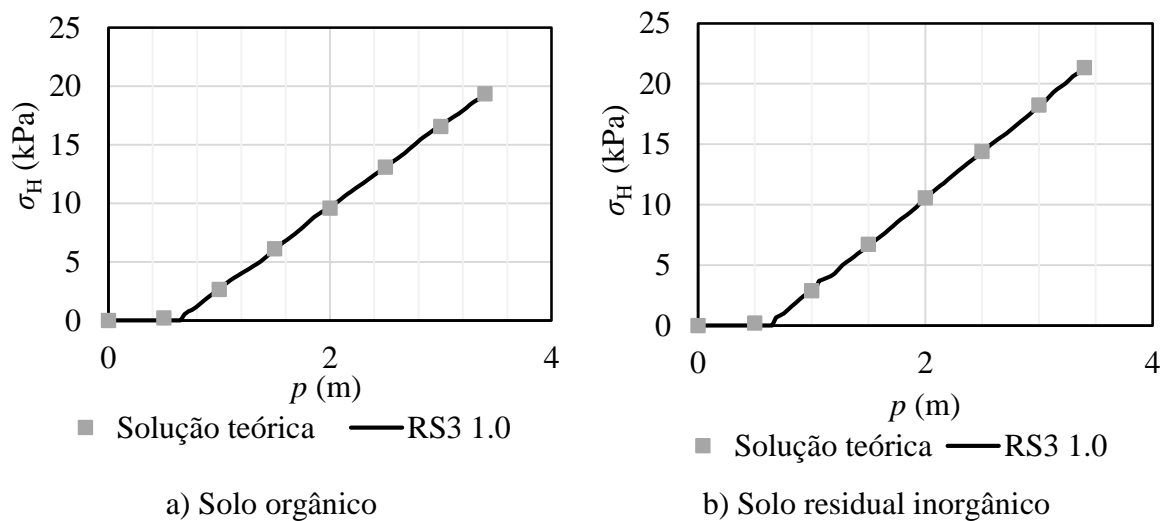


Figura 82 - Evolução da tensão horizontal ao longo da profundidade (Solução teórica - RS³ 1.0)

Como se pode observar, através da análise das Figuras 81 e 82, verifica-se que, quer para as tensões verticais, assim como para as tensões horizontais a resposta fornecida pelo modelo é idêntica à obtida teoricamente para ambos os modelos. Ficando deste modo ambos validados.

5.2.3 Aplicação do deslocamento estático ao prumo

Com base na resposta de deslocamentos em função do tempo registada pelo sensor de posição durante a realização dos ensaios dinâmicos, selecionou-se o instante para o qual ocorria, na base do prumo, o máximo deslocamento. De forma iterativa, no programa, foi-se aplicando um deslocamento no topo do prumo até se obter o deslocamento no topo que provocava o máximo deslocamento na base do mesmo. A Figura 83 corresponde ao deslocamento aplicado no topo do prumo P_{O3} que provoca o máximo deslocamento registado na base. Nos restantes prumos procedeu-se do mesmo modo para a obtenção do deslocamento no topo que correspondia ao máximo deslocamento lido na base.

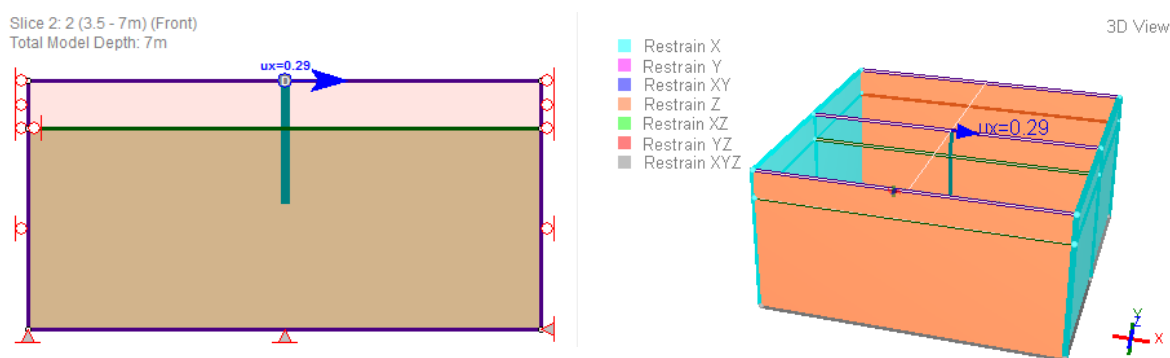


Figura 83 - Aplicação do deslocamento estático ao prumo P_{O3} no programa - RS³ 1.0

5.2.4 Apresentação e análise de resultados

De forma a poder-se comparar os resultados obtidos neste programa com os obtidos no RS² 9.0, foram considerados os mesmos prumos na realização da análise numérica por este programa (Tabela 30).

P_{O3} - Prumo cravado no solo orgânico a 840 mm

A resposta obtida em termos de força por este programa, uma vez que se trata de uma análise estática, não é dada em função do tempo, e por esse motivo encontra-se representada por uma linha horizontal na Figura 84. Na mesma Figura está também representada a curva da força em função do tempo obtida experimentalmente para este prumo.

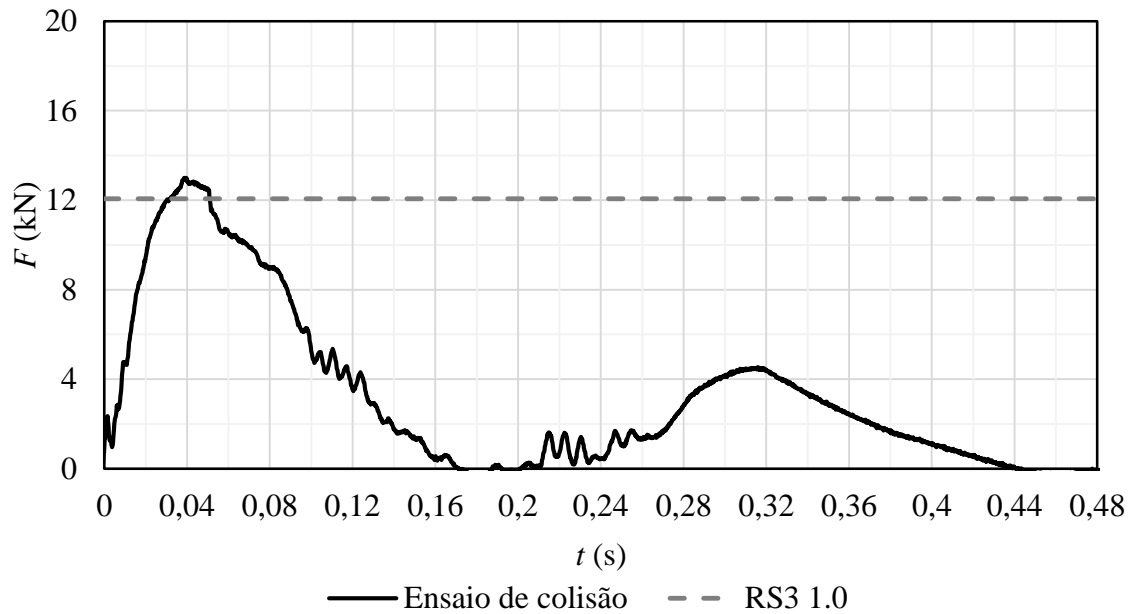


Figura 84 - Comparação da força em função do tempo ($F-t$) obtida experimentalmente com a força obtida no programa RS³ 1.0 para o prumo P₀₃

Comparado o pico de força da curva obtida experimentalmente com a força obtida no programa RS³ 1.0, verifica-se que estas são quase coincidentes para o deslocamento de 290 mm imposto no topo do prumo.

Seguidamente obteve-se a zona de plastificação do solo para o deslocamento imposto (Figura 85).

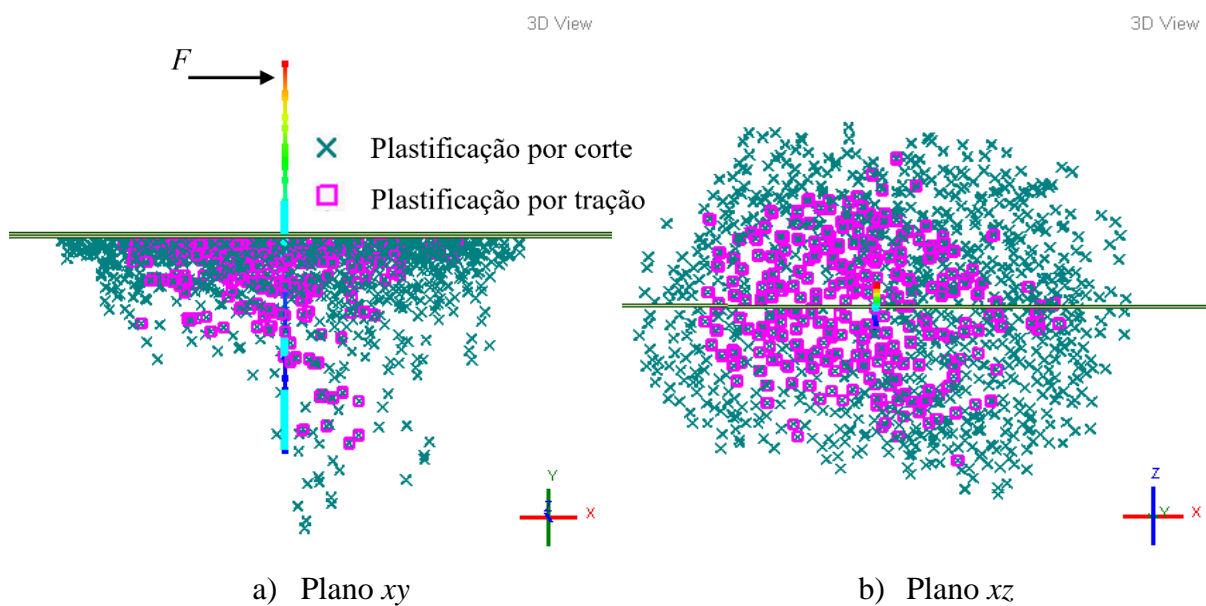


Figura 85 - Zona de plastificação do solo para o prumo P₀₃ - RS³ 1.0

Da análise da Figura 85a, verifica-se que a zona de plastificação do solo se desenvolve ao longo da totalidade da profundidade cravada. Com a utilização deste programa é possível analisar a zona de plastificação tridimensionalmente, estando representado na Figura 85b o plano que permite ter a perceção da área de solo circundante ao prumo que plastificou. Através desta verifica-se que ao longo do eixo de aplicação do deslocamento (eixo xx) existe um maior comprimento de plastificação do que o verificado perpendicularmente a este, embora a discrepância entre eles não seja muito pronunciada.

Seguidamente é comparada a deformada do sistema (solo-prumo) para o deslocamento máximo imposto em ambos os programas considerados neste estudo (Figura 86).

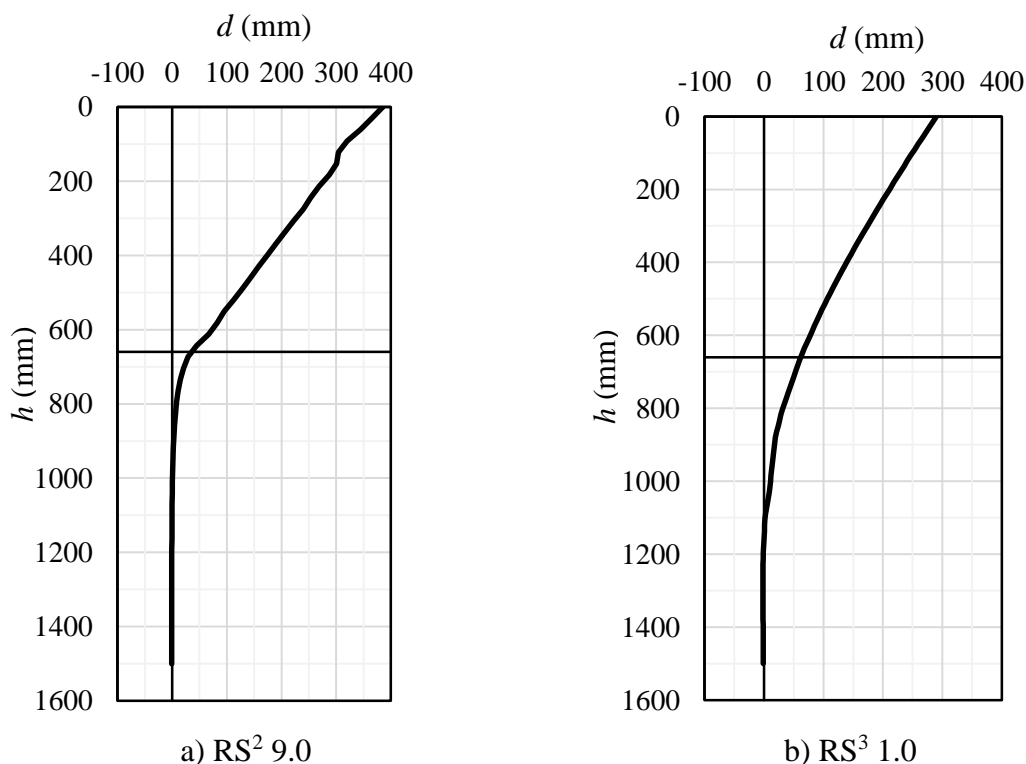


Figura 86 - Comparação entre a deformada do sistema obtida para o deslocamento máximo imposto em cada programa para o prumo P₀₃

Analisando a resposta obtida em termos de deslocamento máximo em função da profundidade verifica-se que os resultados obtidos pelo programa RS³ 1.0 previram menor valor de deslocamento máximo no topo quando comparado com o RS² 9.0 (i.e., $d(\text{RS}^2\ 9.0) = 390\ \text{mm}$ e $d(\text{RS}^3\ 1.0) = 290\ \text{mm}$, respetivamente). Para além disso verifica-se que o prumo não apresenta um ponto bem definido de flexão pois parece comportar-se elasticamente, ao contrário do

sucedido no RS² 9.0 em que o prumo apresenta um ponto de flexão bem definido e comporta-se plasticamente.

P_{O5} - Prumo cravado no solo orgânico a 1040 mm

Na Figura 87 é comparada a curva obtida experimentalmente em termos de força em função do tempo com a força obtida pelo programa RS³ 1.0.

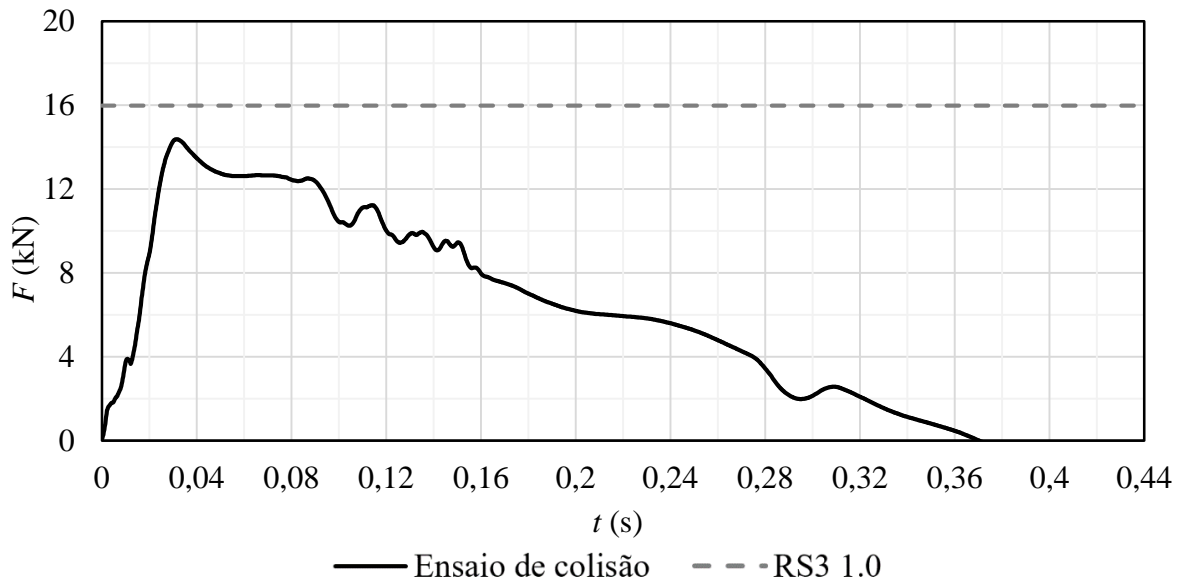


Figura 87 - Comparação da força em função do tempo ($F-t$) obtida experimentalmente com a força obtida no programa RS³ 1.0 para o prumo P_{O5}

Analisando a Figura 87 verifica-se que o pico de força obtido no ensaio experimental realizado a este prumo se encontra muito próximo da força obtida no programa.

Seguidamente é apresentada na Figura 88 a zona de plastificação do solo.

Pela análise da Figura 88a, é possível verificar que a área de plastificação solo vai diminuindo com a profundidade. Observa-se também que existe alguma área de solo plastificado na extremidade cravada do prumo. Analisando agora a Figura 88b é possível verificar a área de solo que plastificou em torno do prumo.

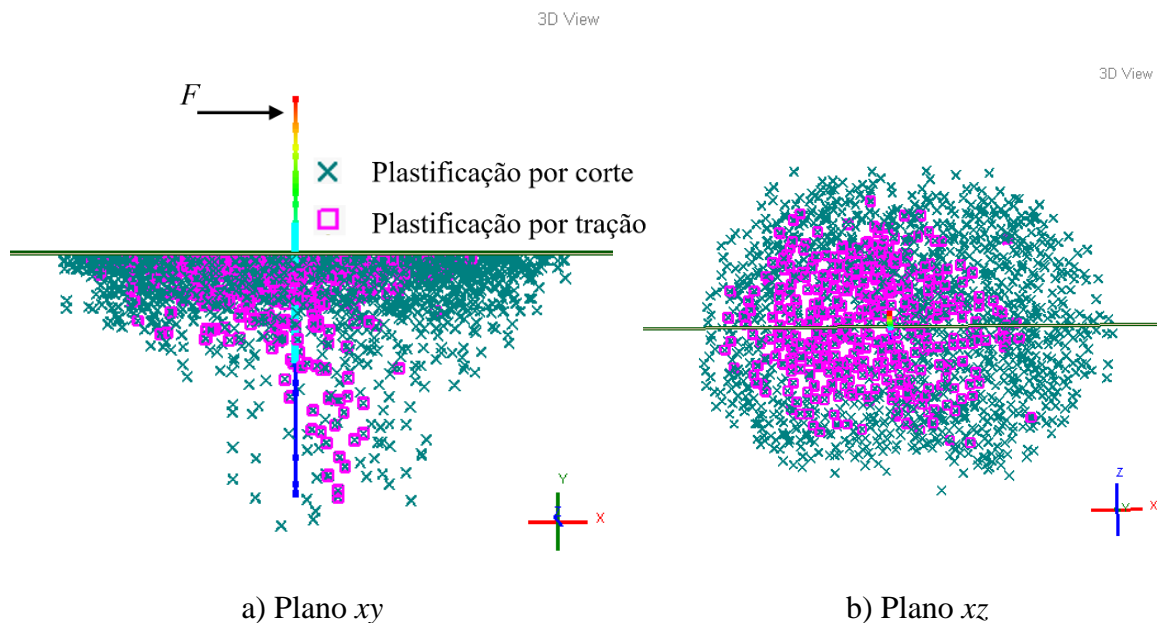


Figura 88 - Zona de plastificação do solo para o prumo P₀₅ - RS³ 1.0

Seguidamente são comparadas as deformadas obtidas por ambos os programas quando foi imposto o deslocamento máximo no topo do prumo (Figura 89).

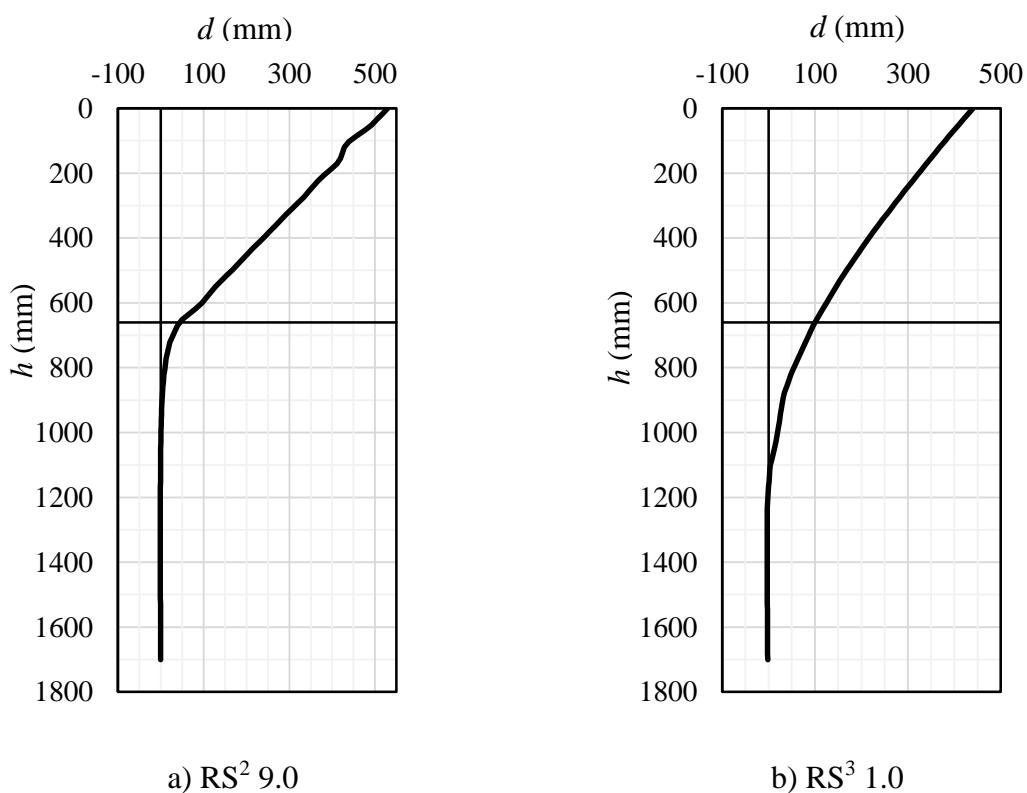


Figura 89 - Comparação entre a deformada do sistema obtida para o deslocamento máximo imposto em cada programa para o prumo P₀₅

Analisando as duas respostas verifica-se que a deformada do sistema obtida no programa RS³ 1.0 possui menores valores de deslocamento no topo do prumo. Verifica-se mais uma vez, que ao passo que o prumo plastifica no programa RS² 9.0, no RS³ 1.0 o prumo parece apresentar um comportamento elástico linear.

P₁₁ - Prumo cravado no solo residual inorgânico a 1040 mm

Na Figura 90 é comparada a curva obtida experimentalmente em termos de força em função do tempo com a força obtida pelo programa RS³ 1.0.

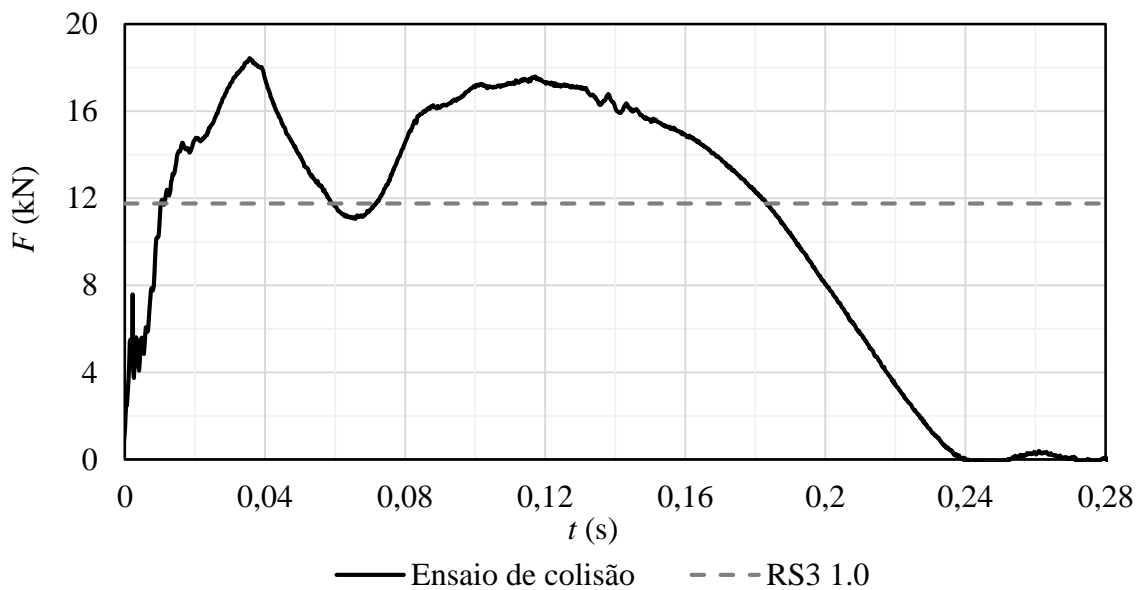


Figura 90 - Comparação da força em função do tempo ($F-t$) obtida experimentalmente com a força obtida no programa RS³ 1.0 para o prumo P₁₁

Da análise da Figura 90 é possível verificar que, ao contrário do sucedido nos dois prumos anteriores, não existiu compatibilidade entre a força de pico lida pela célula de carga no ensaio experimental e a verificada no programa RS³ 1.0.

Relativamente às zonas de plastificação encontram-se representadas na Figura 91.

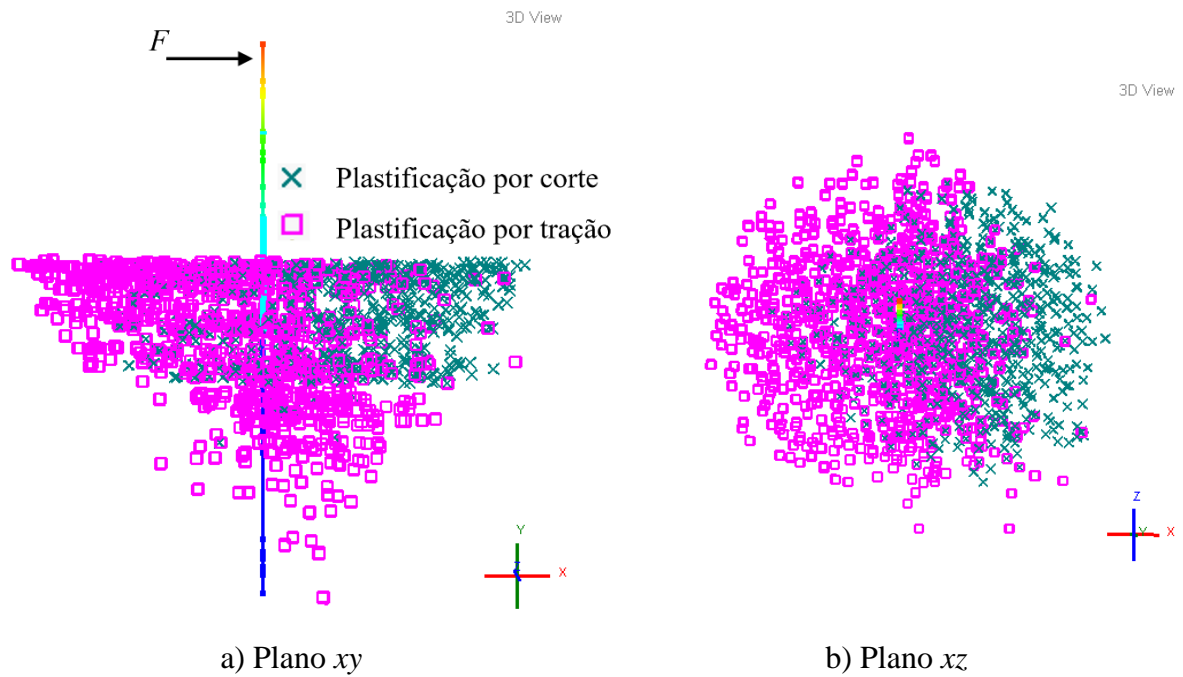


Figura 91 - Zona de plastificação do solo para o prumo P₁₁- RS³ 1.0

Analisando a Figura 91a é possível observar que a área de plastificação do solo diminuiu com o aumento da profundidade. Para além disso, comparando esta com a obtida no prumo anterior (P₀₅), também ele de comprimento total cravado de 1040 mm, mas num solo de menor resistência, verifica-se que não se deu a plastificação do solo existente em todo o comprimento cravado, ao contrário do sucedido no prumo P₀₅. Também no Plano xz se verifica que neste prumo existiu uma alteração na forma da zona de plastificação quando comparada com a dos dois prumos anteriores, passando esta a ser circular.

Seguidamente realiza-se a comparação da deformada, obtida através dos 2 programas, correspondente ao instante em que se verificou o máximo deslocamento no topo do prumo (Figura 92).

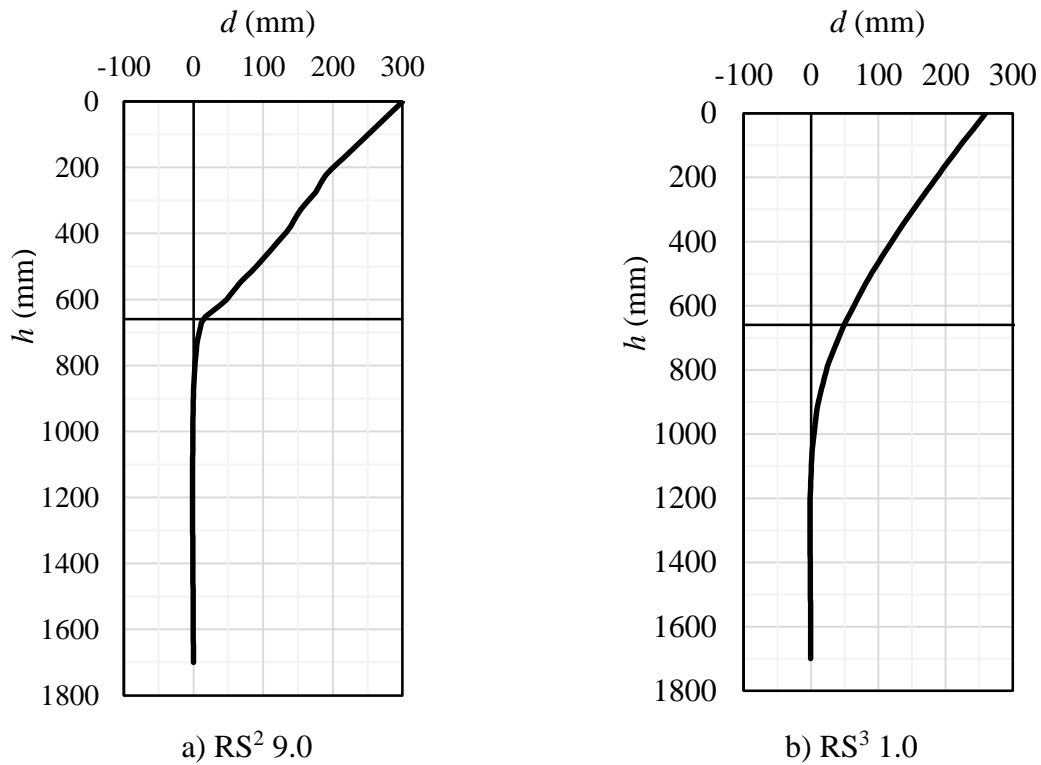


Figura 92 - Comparação entre a deformação do sistema obtida para o deslocamento máximo imposto em cada programa para o prumo P₁₁

Da análise das deformadas obtidas neste prumo, pelos dois programas verifica-se, mais uma vez que os deslocamentos máximos obtidos pelo programa RS³ 1.0 foram ligeiramente inferiores aos obtidos no RS² 9.0. Para além disso, também se verifica que a deformada do prumo obtida pelo programa RS³ 1.0 parece apresentar um comportamento elástico linear.

6. CONCLUSÃO

6.1 Considerações gerais

O objetivo desta dissertação foi o de desenvolver uma metodologia numérica, recorrendo aos programas RS² 9.0 e RS³ 1.0, que permitisse avaliar o desempenho do sistema solo-prumo de guardas de segurança. Esta metodologia foi depois validada através da comparação dos resultados obtidos por esta com os obtidos através da realização de ensaios dinâmicos de colisão. Com isto, foi possível avaliar a influência da profundidade de cravação e tipo de solo no comportamento do sistema solo-prumo. Seguidamente são expostas as principais conclusões retiradas da realização deste estudo.

Relativamente ao sistema de ensaio utilizado para a realização dos ensaios de colisão (i.e., o sistema de pêndulo gravitacional), concluiu-se que este sistema mostrou ser uma boa opção comparativamente às outras possibilidades existentes (i.e., utilização de um veículo ‘bogie’), especialmente a nível económico e da facilidade de adaptação ao relevo do terreno. A opção tomada relativamente à utilização de uma retroescavadora para suportar a massa do pêndulo demonstrou ser uma opção viável, embora que, para se realizarem ensaios de colisão considerando maiores energias de impacto, e consequentemente velocidades mais adequadas, seria necessária a utilização de um equipamento que permitisse uma maior altura de queda do pêndulo. Quanto aos equipamentos de medição utilizados, concluiu-se que, seria evitável a saturação do sensor de posição se se utilizasse um sensor com um maior alcance, e que este se possível, deveria ser instalado em linha com a célula de carga, registando-se de forma direta os deslocamentos obtidos no ponto de impacto no prumo.

Com a realização dos ensaios experimentais e analisados os seus resultados, concluiu-se que o modo de rotura típico do sistema se deu pelo prumo e que após o impacto existia uma recuperação de parte do estado inicial do sistema (principalmente do solo). Concluiu-se que a força registada pela célula de carga para prumos com um mesmo comprimento e com energias de impacto semelhantes, mas ensaiados em solos distintos foi superior no solo de maior resistência (i.e., solo residual inorgânico), o que demonstra que o comportamento do sistema

foi influenciado pelo tipo de solo no qual foi cravado. Para além disso, os deslocamentos registados na base do prumo demonstraram que o prumo cravado no solo de maior resistência possuiu menores deslocamentos e em metade do tempo, quando comparado com os deslocamentos verificados nos prumos ensaiados nas mesmas condições, mas cravados no solo de menor resistência, o que demonstra mais uma vez a influência do tipo de solo no desempenho do sistema.

Do desenvolvimento das metodologias numéricas recorrendo aos programas RS² 9.0 e RS³ 1.0, concluiu-se que a análise dinâmica através do programa RS² 9.0 permitiu uma melhor perceção do comportamento do sistema solo-prumo quando comparada com análise estática realizada no programa RS³ 1.0. Concluiu-se que embora o RS³ 1.0 não permita realizar uma análise dinâmica, conseguiu reproduzir mais fidedignamente o comportamento do sistema observado experimentalmente, o que se deve principalmente ao facto deste programa realizar uma análise tridimensional do modelo, enquanto que o RS² 9.0 realiza uma análise bidimensional, simulando o prumo como uma seção equivalente por metro de desenvolvimento, muito distinta da geometria real do prumo. Também se concluiu que uma das limitações comum aos dois programas residiu no facto de não ser possível aplicar a solicitação ao prumo sem que este se encontrasse fora da superfície do solo, e por esse motivo tornou-se necessário criar uma camada de solo de elevada resistência mecânica e baixa rigidez. Por último, concluiu-se que existiu claramente influência do tipo de solo utilizado e da profundidade de cravação por ambas as análises numéricas no desempenho do sistema solo-prumo.

6.2 Estudos futuros

Por forma a poder-se explorar de forma mais profunda esta temática, são sugeridos os seguintes estudos futuros:

- Realização dos ensaios dinâmicos de colisão aos restantes prumos cravados na Universidade do Minho para validação das melhorias sugeridas;
- Recurso a ferramenta numérica que permita análises tridimensionais com consideração dos efeitos dinâmicos;
- Caracterização de solos tipos e criação de tabelas que permita a rápida obtenção da resposta de um sistema solo-prumo;
- Definição de um procedimento *in situ* expedito que permitam a seleção do solo tipo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFNOR (1991). *Barrières de securite routieres - glissieres de securite en acier (profils a et b) - dimensions et specifications techniques de fabrication des elements de glissement*, ref. NF P 98-411: 1991.

ARMSTRONG, K. S., KLINGNER, R. E. & STEVES, M. A. *Response of highway barriers to repeated impact loading: steel post barriers*. Technical Report Documentation, Texas State Department of Highways and Public Transportation, Texas, 1985.

ASTM (1998). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*, ref. D 3080: 1998.

ASTM (2011). *Standard Practice for Classification of soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, ref. D 2487: 2011.

ATAHAN, A. O. *Finite Element Simulation of a Strong Post W-Beam Guardrail System. Simulation*. 2002, Vol. 78, No. 10, Turkey.

BIERMAN, B. G., HOLLOWAY, J. C., PFEIFER, B.T., ROSSON & SICKING, D. L. *Performance Evaluation of KDOT W-Beam Systems*. Technical Report Documentation, Midwest Roadside Safety Facility, Lincoln, 1996.

BLIGH, R. P., SECKINGER, N. R., ABU-ODEH, A. Y., ROSCHKE, P. N., MENGES, W. L. & HAUG, R. R. *Dynamic response of guardrail systems encased in pavement mow strips*. Technical Report Documentation, Texas Transportation Institute, Texas, 2004.

BORKOWSKI, W., HRYCIÓW, Z., RYBAK, P., WYSOCKI, J. & WIŚNIEWSKI, A. *Studies on the effectiveness of the innovative road safety system. Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2014, Vol. 21, No. 2, Warszawa.

CALCOTE, L. R. & KIMBALL, C. E. *Properties of Guardrail Posts for Various Soil Types*.

Transportation Research Record, National Research Council, Washington, D. C., 1978.

CEN (2010a). *Road Restraint Systems-part 1: Terminology and general criteria for test methods*, ref. EN 1317-1: 2010.

CEN (2010b). *Road Restraint Systems-part 2: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers including vehicle parapets*, ref. EN 1317-2: 2010.

CONSOLAZIO, G. R., BUI, L. H. & WALTERS, R. A. *Pendulum Impact Testing of an Impact-Breakaway, Wind-Resistant Base Connection for Multi-Post Ground Signs*. Technical Report Documentation, University of Florida, Florida, 2012.

COON, B. A., REID, J. D. & ROHDE, J. R. *Dynamic impact testing of guardrail posts embedded in soil*. Technical Report Documentation, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, 1999.

EGGERS, W., HIRSCH, T. J., & ROSS, J. R. *Strength of Guardrail Post in Rock*. Technical Report Documentation, Texas Transportation Institute, Texas, 1984.

EGGERS, W. & HIRSCH, T. J. *The Effects of Embedment Depth, Soil Properties, and Post Type on the Performance of Highway Guardrail Post*. Technical Report Documentation, Texas Transportation Institute, Texas, 1986.

ENGSTRAND, K. E. *Improvements to the weak-post w-beam guardrail*. Master thesis, Worcester Polytechnic Institute: Worcester, 2000.

EHLERS, U. *Assessing the need and cost-effectiveness of high containment level safety barriers in Finland*. Master thesis, Aalto University: Espoo, 2010.

GATCHELL, C. J. & MICHIE, J. D. *Pendulum Impact Tests of Wooden and Steel Highway Guardrail Posts*. *USDA Forest Service Research Paper*. 1974, No. 311.

GULBENKIAN, G. S. B. *Otimização de topologia de estruturas aplicada a guardas de segurança rodoviária*. Universidade Nova de Lisboa: Lisboa, 2011.

GUTKOWSKI, R., SHIGIDI, A., PETERSON, M. *Dynamic Impact Load Tests of a Bridge Guardrail System*. Report Documentation, Colorado State University, Colorado, 2007.

HASCALL J. A., REID, J. D., FALLER, R. K. & SICKING, D. L. *Investigating the use of small-diameter softwood as guardrail posts (dynamic test results)*. Final Report, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, 2007.

IGPAI (1965). *Solos. Determinação do teor em água*, ref. NP 84: 1965.

IGPAI (1969). *Solos. Determinação dos limites de consistência*, ref. NP 143: 1969.

INIR (2010). *Disposições Normativas-Sistemas de retenção de segurança - Infraestruturas de Portugal*, ref. LNEC 0703-1-17195: 2010.

IPQ (2010). *Eurocódigo 3 -Projeto de estruturas de aço. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*, ref. NP 1993-1-1: 1993.

JAKY, J. The coefficient of earth pressure at rest. *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineering*. 1944, Vol. 1, No. 355-358, Hungary.

JIGA, G., STAMIN, Ș., POPOVICI, D. & DINU, G. Study of Shock Attenuation for Impacted Safety Barriers. *International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*. 2013, Vol. 69, No. 1191 - 1200, Romania.

KUIPERS, B. D. & REID, J. D. *Testing of W152×23.8 steel posts - soil embedment depth study for the Midwest guardrail system (non-proprietary guardrail system)*. Research Report, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, 2003.

LIMA, H. M. P. *Comportamento funcional e estrutural das barreiras de segurança*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto: Porto, 2006.

LNEC (1966a). *Solos. Análise granulométrica*, ref. E 196: 1966.

LNEC (1966b). *Solos. Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação*, ref. E 195: 1966.

LNEC (1967). *Solos. Determinação do teor em matéria orgânica*, ref. E 201: 1967.

LOTTI, R. S., MACHADO, A. W., MAZZIEIRO Ê. T. & JÚNIOR J. L. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. *R Dental Press Ortodon Ortop Facial*. 2006, Vol. 11, No. 2, Maringá.

MICHIE, J. D. *Response of Guardrail Posts During Impact*. Technical Report Documentation, Southwest Research Institute, Texas, 1970.

NAUMAN, M. S., ABU-ODEH, A. Y. & BLIGH, R. P. *Finite element modelling and validation of guardrail steel post deflection in soil at varying embedment depths*. 11th International LS-DYNA users conference, Texas Transportation Institute, Texas, 2010.

NCHRP (1993). *Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features*, ref. R 350: 1993.

NPRA (2011). *Vehicle Restraint Systems and Roadside Areas*. Norwegian Public Roads Administration, Norwegian, 2011.

RIBEIRO, A. C. *Modelação em reconstituição de acidentes*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho: Guimarães, 2014.

ROQUE, C. A. *As condições de fundação dos prumos e o desempenho das guardas de segurança flexíveis*. Publicação em ata, 3º Congresso rodoviário português, Lisboa, 2004.

SARATHCHANDRAN, A. *Three Dimensional Numerical Modelling of Coal Mine Roadways Under High Horizontal Stress Fields*. Master thesis, University of Exeter: Exeter, 2014.

SILVA, B. A. E. S. *Otimização do comportamento dos sistemas de ligação nas barreiras de proteção das estradas*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho: Guimarães, 2011.

SOLTANI, M., KARIM, M. R. & RAMLI-SULONG, N. H. Evaluating the Performance of Roadside Barrier Using Surrogate Devices. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. 2011, Vol. 8, Kuala Lumpur.

TABIEI, A. & WU, J. Roadmap for crashworthiness finite element simulation of roadside safety structures. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2000, Vol. 34, No. 145-157, Cincinnati.

TAVARES, J. A. S. *Simulação numérica do comportamento ao impacto de estruturas utilizadas em segurança rodoviária*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho: Guimarães, 2012.

VINAGRE, M. J. L. *As guardas de segurança para proteção a motociclistas. Características e graus de eficácia*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa: Lisboa, 2013.

WU, W. & THOMSON R. A study of the interaction between a guardrail post and soil during quasi-static and dynamic loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2007, Vol. 34, No. 883-898, Gothenburg.

ANEXO A

Cálculo da inclinação da massa (β), da energia de impacto (E_{impacto}) e da velocidade de impacto (v_{impacto})

Sabendo-se a altura a que massa de betão armado foi suspensa pela retroescavadora (i.e., 3,255 m), recorreu-se à Figura 93, que corresponde exatamente ao momento antes da massa ser largada, calculou-se sua inclinação e posteriormente a energia e velocidade de impacto correspondente. Tendo-se procedido do seguinte modo:

- Determinou-se, através da Figura 93, o valor de y ;
- Calculou-se a inclinação (β) a que o centro de massa do pêndulo estaria em relação à vertical;
- Seguidamente determinou-se a altura (x) a que o centro de massa do pêndulo subiu em relação à posição inicial;
- Através da expressão (7), calculou-se a energia de impacto;
- Por fim, calculou-se a velocidade recorrendo-se à expressão (8).

$$E_p = m \times g \times h \quad (7)$$

$$E_c = \frac{1}{2} m \times v^2 \quad (8)$$

Através da realização dos procedimentos descritos anteriormente, para cada prumo ensaiado, obteve-se os resultados da Tabela 25.

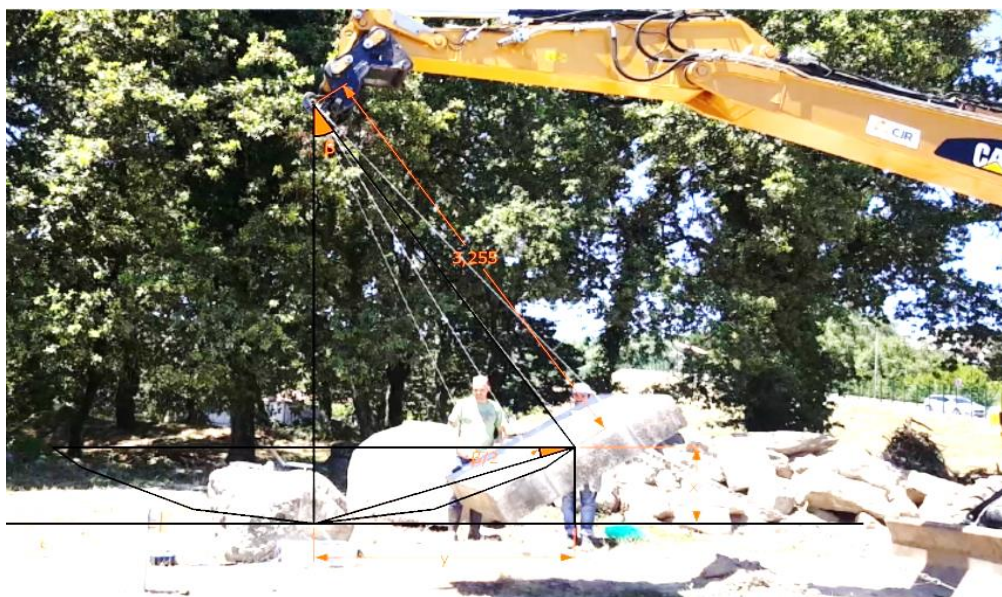


Figura 93 - Registo fotográfico do momento imediatamente antes da massa ser largada (P_{01})

ANEXO B

Cálculo da força resistente (F_{Rd}) do prumo

Para se determinar a força resistente da seção transversal do prumo utilizou-se a expressão (9).

$$F_{Rd} = \frac{M_{Rd}}{b_r} \quad (9)$$

Em que,

M_{Rd} : Momento resistente do prumo (kN.m);

F_{Rd} : Força resistente do prumo (kN);

b_r : Distância entre a base do prumo e o ponto de aplicação da carga (m).

Sabendo-se que M_{Rd} para a seção transversal do prumo é calculado pela expressão 10.

$$M_{Rd} = w_{el} \times f_y \quad (10)$$

Em que,

w_{el} : Módulo resistente elástico (m³);

f_y : Tensão de cedência do aço (KPa).

e que, o módulo resistente elástico (w_{el}) é dado pela expressão (11)

$$w_{el} = \frac{I}{z} \quad (11)$$

Em que,

I : Inércia segundo o eixo pretendido (eixo de menor inércia) (m⁴);

z : Distância do centro de gravidade da peça à primeira fibra a atingir a cedência (m).

Obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Resultado da determinação da força resistente da seção do prumo

| w_{el} (m ³) | M_{Rd} (kN.m) | F_{Rd} (kN) |
|----------------------------|-----------------|---------------|
| $1,57 \times 10^{-5}$ | 3,69 | 6,70 |

ANEXO C

Determinação da espessura equivalente ($e_{\text{equivalente}}$) a introduzir no programa RS² 9.0

Devido à bidimensionalidade do modelo, o programa, por definição, assume o desenvolvimento perpendicular ao plano por metro. Assim sendo, tornou-se necessário determinar as dimensões de uma seção equivalente à seção real do prumo. Sabendo-se que uma das dimensões seria de um metro o objetivo passou pela determinação da $e_{\text{equivalente}}$ a introduzir no programa.

Sabendo-se que a seção equivalente ($1 \times e_{\text{equivalente}}$) se trata de um perfil retangular e impondo o valor de w_{el} calculado para a seção real do prumo, determinou-se a $e_{\text{equivalente}}$ com base na seguinte relação.

$$1,57 \times 10^{-5} = \frac{\frac{1 \times e_{\text{equivalente}}^3}{12}}{\frac{e_{\text{equivalente}}}{2}} \leftrightarrow e_{\text{equivalente}} = 0,0097 \text{ m}$$