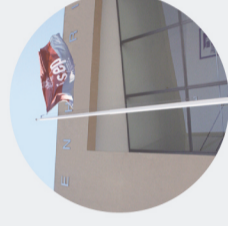




## Muros de solo reforçado com pneus. Instrumentação de Modelo físico e Modelação numérica

JOANA CATARINA DA SILVA CARDOSO

novembro de 2017



## Muro de solo reforçado com pneus. Instrumentação de modelo físico e modelação numérica

JOANA CATARINA DA SILVA CARDOSO  
Novembro de 2017



# **MUROS DE SOLO REFORÇADO COM PNEUS. INSTRUMENTAÇÃO DE MODELO FÍSICO E MODELAÇÃO NUMÉRICA**

JOANA CATARINA DA SILVA CARDOSO

Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS**

Orientador: José Filinto Castro Trigo (ISEP)

Supervisor: José Filinto Castro Trigo (Laboratório de Estruturas | ISEP)

# **MUROS DE SOLO REFORÇADO COM PNEUS. INSTRUMENTAÇÃO DE MODELO FÍSICO E MODELAÇÃO NUMÉRICA**

JOANA CATARINA DA SILVA CARDOSO

Relatório de Estágio submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE ESTRUTURAS**

Orientador: José Filinto Castro Trigo (ISEP)

Supervisor: José Filinto Castro Trigo (Laboratório de Estruturas | ISEP)

**NOVEMBRO DE 2017**

# ÍNDICE GERAL

Índice Geral.....	iii
Resumo .....	v
Abstract .....	vii
Agradecimentos .....	ix
Índice de Texto.....	xi
Índice de Figuras .....	xiii
Índice de Tabelas.....	xix
Abreviaturas .....	xxi
CAPÍTULO 1    Introdução .....	1
CAPÍTULO 2    Pneus em fim de vida .....	3
CAPÍTULO 3    Modelo físico .....	29
CAPÍTULO 4    Modelo numérico.....	53
CAPÍTULO 5    Apresentação, interpretação e comparação de resultados .....	65
CAPÍTULO 6    Conclusões e desenvolvimentos futuros .....	90
Referências Bibliográficas.....	91
Anexo I – Ficha técnica das células de pressão.....	95
Anexo II – Ficha técnica do Datataker .....	101
Anexo III – Ficha técnica dos LVDTs instalados.....	105



## RESUMO

A quantidade de pneus em fim de vida, abandonados ao ar livre, levou à implementação de normas em diversos países com o objetivo de mitigar os impactos ambientais associados a essa prática frequente.

Foram então criados sistemas de gestão para garantir um destino ambientalmente aceitável para os pneus em fim de vida. Os pneus são encaminhados para esses sistemas de gestão de resíduos.

A reciclagem de um pneu é um processo que requer grandes dificuldades técnicas e económicas, pelo que se torna imperativa a diversificação de formas da sua valorização. A integração de pneus no setor da construção civil é uma das opções válidas para essa valorização.

O presente trabalho tem como objetivo a validação de uma solução de estrutura de solo reforçado com pneus, preenchidos com solo, estendendo a esta tipologia de estruturas a técnica de Pneusol, patenteada por Long, Nguyen Thanh, em 1984.

Procedeu-se a uma revisão bibliográfica do tema, concebeu-se e materializou-se um modelo físico à escala reduzida e desenvolveu-se o correspondente modelo numérico, recorrendo ao programa de cálculo automático RS<sup>2</sup>, da Rocscience, com o intuito de avaliar o desempenho desta tecnologia construtiva.

O modelo físico foi instrumentado com células de pressão, instaladas no aterro suportado, e com transdutores de deslocamentos aplicados no paramento da estrutura.

Ensaíram-se duas geometrias de reforço do solo e três diferentes sobrecargas, comparando-se os resultados obtidos no modelo físico com os fornecidos pelo modelo numérico com formulação por elementos finitos, permitindo a respetiva calibração.

**Palavras-chave:** Pneus, solo reforçado, Pneusol, modelo à escala reduzida, elementos finitos, RS<sup>2</sup>, instrumentação.



## **ABSTRACT**

The amount of tires in end-of-life, abandoned in open air, led to the implementation of standards in several countries with the purpose of relieve the environmental impacts associated to this frequent practice.

Management Systems were created to ensure an environmentally acceptable destination for the end-of-life tires. These tires are routed to a waste management system.

The recycling of a tyre is a process that requires great technical and economical difficulties, so it becomes imperative to diversify ways of its recovery.

The present work has the objective to validate the solution of reinforced soil with tires filled with soil, applying to this typology of structures the Pneusol technique, patented by Nguyen Thanh Long in 1984.

A bibliographic review of the theme is presented, a reduced-scale physical model was conceived and materialized, and the corresponding numerical model was developed, using the Rocscience automatic calculation program RS<sup>2</sup>, with the purpose of evaluating the performance of this constructive technology.

The physical model was instrumented with pressure cells, installed in the supported landfill, and with displacement transducers, applied to the structure face.

Two soil reinforcement geometries and three different overloads were tested, comparing the results obtained in the physical model with those provided by the numerical model with finite element formulation, allowing its calibration.

**Keywords:** Tires, reinforced soil, Pneusol, reduced scale model, finite elements, RS<sup>2</sup>, instrumentaion.



## **AGRADECIMENTOS**

Quero deixar aqui expresso o meu agradecimento a todas as pessoas e entidades que direta ou indiretamente contribuíram para a realização do presente relatório de estágio, em especial:

Ao meu orientador, Engenheiro José Filinto Trigo pela disponibilidade, dedicação, paciência e por toda a partilha de conhecimento e sabedoria que sempre demonstrou ao longo deste percurso, o meu muito obrigado.

À Presidência do ISEP pela autorização de ocupação de um espaço na garagem do edifício F.

Ao Engenheiro Paulo Guedes, Diretor do Laboratório de Estruturas, pela disponibilização do equipamento laboratorial.

Aos Serviços de Manutenção do ISEP, pelo apoio e empréstimo de ferramentas.

Ao Engenheiro Agostinho Mendonça, pelo fornecimento do solo de aterro.

Ao Engenheiro Mário Alvim, pelo fornecimento dos depósitos de água.

Ao Laboratório de Mecânica Aplicada, em particular aos Engenheiros Jorge Justo, Fernando Ferreira e Gustavo Pinto, pela disponibilização da célula de carga.

Ao Engenheiro Carlos Rodrigues, pela disponibilidade demonstrada no esclarecimento de diversas dúvidas que surgiram no decorrer dos trabalhos em laboratório e na instrumentação do modelo físico.

Aos mesmos amigos de curso, em particular ao meu amigo João Fernandes que me acompanhou na grande maioria deste percurso, pela disponibilidade, boa disposição e, acima de tudo, por toda a cooperação nos diversos trabalhos de laboratório realizados.

Ao meu namorado, que me acompanhou ao longo da minha formação académica, que me deu um apoio insubstituível e que sempre me motivou a concluir o Mestrado, o meu muito obrigada.

Aos meus pais, pelo carinho, mas acima de tudo pela paciência que sempre demonstraram ao longo do meu percurso académico.

A todos, o meu obrigado.



# ÍNDICE DE TEXTO

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>Pneus em fim de vida</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Considerações gerais</b>	<b>3</b>
<b>2.2</b>	<b>Situação atual no Mundo</b>	<b>4</b>
2.2.1	Sistema de gestão de pneus em fim de vida na Europa	8
<b>2.3</b>	<b>Situação em Portugal</b>	<b>12</b>
2.3.1	Sistema de Gestão	12
<b>2.4</b>	<b>Soluções de reutilização</b>	<b>17</b>
2.4.1	Alcatrões de borracha	18
2.4.2	Pavimentos desportivos	18
2.4.3	Materiais para isolamento sonoro	19
2.4.4	Aplicação urbana	19
2.4.5	Engenharia Civil	21
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>Modelo físico</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Modelos físicos à escala reduzida</b>	<b>29</b>
<b>3.2</b>	<b>Caracterização da geometria e faseamento construtivo</b>	<b>30</b>
<b>3.3</b>	<b>Instrumentação do modelo físico</b>	<b>43</b>
3.3.1	Células de pressão de corda vibrante	43
3.3.2	Transdutores de deslocamento	46
3.3.3	Célula de carga	48
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>Modelo numérico</b>	<b>53</b>
<b>4.1</b>	<b>Programa de cálculo automático <math>RS^2</math></b>	<b>53</b>
<b>4.2</b>	<b>Modelo numérico com geometria atual</b>	<b>53</b>
<b>4.3</b>	<b>Modelo numérico com geometria modificada</b>	<b>60</b>
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>Apresentação, interpretação e comparação de resultados</b>	<b>65</b>
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>Conclusões e desenvolvimentos futuros</b>	<b>90</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução da recuperação dos pneus em fim de vida nos últimos 17 anos ( <a href="http://www.etrma.org">www.etrma.org</a> )..	5
Figura 2.2 – Recuperação dos pneus em fim de vida (Adaptado de: <a href="http://www.etrma.org/">www.etrma.org/</a> ).....	6
Figura 2.3 – A gestão dos pneus em fim de vida na europa em 2010 (Adaptado de: <a href="http://www.etrma.org/">www.etrma.org/</a> ).....	7
Figura 2.4 – As empresas de gestão dos pneus em fim de vida implementação em cada país (Adaptado de: <a href="http://www.etrma.org/">www.etrma.org/</a> ).....	8
Figura 2.5 – Usos atuais para os pneus em fim de vida (Adaptado de: EndOfLifeTires-FullReport). ....	9
Figura 2.6 – Modelo de funcionamento do SGPU (Valorpneu,2013) .....	14
Figura 2.7 – Pneus colocados no mercado, gerados, recolhidos (Valorpneu).....	16
Figura 2.8 – Destino dos pneus recolhidos pelo SGPU – 2003 a 2015 (Valorpneu). ....	16
Figura 2.9 – Gestão dos pneus usados 2015 (Valorpneu). ....	17
Figura 2.10 – Reciclagem dos pneus (Valorpneu). ....	18
Figura 2.11 – Alcatrão de borracha ( <a href="http://www.greenme.com.br">www.greenme.com.br</a> ). ....	18
Figura 2.12 – Pavimento desportivo com pneus triturado ( <a href="http://www.greenme.com.br">www.greenme.com.br</a> ). ....	19
Figura 2.13 – Membranas ( <a href="http://www.greenme.com.br">www.greenme.com.br</a> ). ....	19
Figura 2.14 – Calçada portuguesa ( <a href="http://automotiverevista.com">automotiverevista.com</a> ). ....	20
Figura 2.15 - Exemplo de um muro de suporte de terras construído com a técnica de pneusol ( <a href="http://www.lins.sp.gov.br">www.lins.sp.gov.br</a> ). ....	23
Figura 2.16 – Exemplo de ligação e posicionamento em quincôncio ( <a href="http://www.ebah.com.br">www.ebah.com.br</a> ). ....	24
Figura 2.17- Nó tipo “marinheiro” ( <a href="http://prof.augusto.zip.net">prof.augusto.zip.net</a> ).....	25
Figura 2.18 – Exemplo de um muro de suporte de terras ( <a href="http://aconstrutoravion.blogspot.pt">aconstrutoravion.blogspot.pt</a> ). ....	26
Figura 2.19 – Edifício do projeto Utopia ( <a href="http://utopia.plako.net">utopia.plako.net</a> ).....	27
Figura 3.1 – Faseamento construtivo da 1ª à 3ª camada.....	30

Figura 3.2 – Faseamento construtivo da 4ª à 6ª camada.....	31
Figura 3.3 – Faseamento construtivo da 7ª à 9ª camada.....	31
Figura 3.4 – Faseamento construtivo da 10ª à 12ª camada.....	32
Figura 3.5 – Faseamento construtivo da 13ª à 14ª camada.....	32
Figura 3.6 – Faseamento construtivo com aplicação da sobrecarga.....	33
Figura 3.7 – Modelo inicial. ....	34
Figura 3.8 – Esquema em planta e em corte da instrumentação instalada no modelo inicial.....	34
Figura 3.9 – Escavação do solo junto ao paramento.....	35
Figura 3.10 – Retirada do reforço superior. ....	36
Figura 3.11 – Modelo sem reforço superior e com os depósitos junto ao paramento.....	36
Figura 3.12 – Descarga, alteração da geometria do modelo e novo carregamento. ....	37
Figura 3.13 - Instalação de cinco transdutores de deslocamentos. ....	38
Figura 3.14 – Descarga e nova alteração da geometria do carregamento.....	39
Figura 3.15 – Esquema em planta e em corte com a posição da instrumentação.....	40
Figura 3.16 – Modelo e esquema de aplicação da força horizontal.....	40
Figura 3.17 - Linha de tempo da evolução do modelo e do respetivo carregamento. ....	41
Figura 3.18 - Célula de pressão de corda vibrante. ....	43
Figura 3.19 – Peneiração do solo envolvente das células (Fonseca A., Santos R., 2016). ....	44
Figura 3.20 – Posicionamento das células (Fonseca A., Santos R., 2016). ....	45
Figura 3.21 – Colocação da camada fina de solo sobre as células (Fonseca A., Santos R., 2016). ....	45
Figura 3.22 – Compactação do solo peneirado (Fonseca A., Santos R., 2016). ....	45
Figura 3.23 – LVDT.....	46
Figura 3.24– Localização da instrumentação - esquema em planta. ....	47
Figura 3.25– Localização da instrumentação - esquema em corte. ....	48
Figura 3.26- Macaco hidráulico. ....	48
Figura 3.27 – Esquema em corte do posicionamento da célula, chapa e o pistão do macaco. ....	49
Figura 3.28 – Esquema em corte do posicionamento do macaco hidráulico.....	49

Figura 3.29 – Conjunto macaco hidráulico, perfil UNP e célula de carga.....	50
Figura 3.30 – Pormenor de ligação.....	50
Figura 3.31 – Transição entre macaco hidráulico e célula de carga, fases do processo de produção da peça metálica. ....	51
Figura 4.1 – Modelo físico à escala reduzida (Magalhães,2004).....	54
Figura 4.2 – Resultados dos deslocamentos totais na última fase (Magalhães,2004). ....	54
Figura 4.3 - Características dos materiais (Magalhães,2004).....	55
Figura 4.4 - Características do elemento de junta (joint1) (Magalhães,2004). ....	55
Figura 4.5 - Características do novo elemento de junta.....	56
Figura 4.6 – Malha com o novo elemento de junta (joint1 e joint2).....	56
Figura 4.7 – Deslocamentos totais com introdução do elemento junta (joint2).....	57
Figura 4.8 - Características atribuídas ao comportamento do pneusol. ....	58
Figura 4.9 – Resultados dos deslocamentos totais com alteração do comportamento do Pneusol.....	59
Figura 4.10 - Malha com o elemento de junta Joint 2 em toda a estrutura.....	59
Figura 4.11 – Resultados dos deslocamentos totais com o joint2 em toda a estrutura. ....	60
Figura 4.12 – Malha de elementos finitos do modelo sem reforço superior e com nova posição dos depósitos.....	61
Figura 4.13 – Resultados dos deslocamentos na ultima fase (comportamento transversal isotrópico) do modelo sem reforço superior e com nova posição dos depósitos.....	62
Figura 4.14 - Resultados dos deslocamentos com aplicação da força horizontal de 4000 N. ....	63
Figura 4.15 – Resultados dos deslocamentos com aplicação da força horizontal de 9500 N. ....	63
Figura 5.1 – Deslocamento do paramento inicial na fase de carregamento (alinhamento a1 dos transdutores de deslocamentos). ....	66
Figura 5.2 – Deslocamentos do paramento inicial na fase de carregamento comparação entre os valores medidos e calculados .....	67
Figura 5.3 – Deslocamentos do paramento do modelo inicial na fase de descarga (alinhamento a1).....	68
Figura 5.4 - Deslocamentos do paramento do modelo inicial da descarga. Comparação entre valores medidos e calculados. ....	69

Figura 5.5 – Deslocamento do paramento do modelo sem reforço superior na fase de carregamento com sobrecarga vertical.....	70
Figura 5.6 – Deslocamentos do paramento do modelo sem reforço superior, na última fase do carregamento com sobrecarga vertical. Comparação entre valores medidos e calculados.....	71
Figura 5.7 – Deslocamentos do paramento do modelo sem reforço superior na última fase do carregamento com sobrecarga vertical e após descarga. Comparação entre valores medidos e calculados.....	72
Figura 5.8 – Deslocamentos do paramento do modelo sem reforço superior na última fase do carregamento com sobrecarga vertical. Comparação entre carregamento atual com o anterior. ....	73
Figura 5.9 – Deslocamento do paramento, com aplicação da força horizontal, medido com o LVDT 1....	75
Figura 5.10 - Deslocamento do paramento, com aplicação da força horizontal, medido com o LVDT 2...	75
Figura 5.11 - Deslocamento do paramento, com aplicação da força horizontal, medido com o LVDT 3...	76
Figura 5.12 - Deslocamento do paramento, com aplicação da força horizontal, medido com o LVDT 4...	76
Figura 5.13 - Deslocamento do paramento, com aplicação da força horizontal, medido com o LVDT 5...	77
Figura 5.14 - Deslocamentos do paramento com aplicação da força horizontal. ....	77
Figura 5.15 – Deslocamentos do paramento com a aplicação da força horizontal em função do tempo.	78
Figura 5.16 –Deslocamentos no final da aplicação da força. ....	79
Figura 5.17 – Esquema com o antes e após a aplicação da força horizontal. ....	79
Figura 5.18 – Evolução do valor da força horizontal, ao longo do tempo.....	80
Figura 5.19 – Deslocamentos do paramento do modelo sem reforço superior, na última fase do carregamento, com carga vertical e força horizontal. ....	81
Figura 5.20 – Deslocamentos do paramento do modelo sem reforço superior, na última fase do carregamento, com carga vertical e força horizontal na fase de descarga.....	82
Figura 5.21 – Valores das pressões medidas nas células no modelo inicial. ....	83
Figura 5.22 –Valores das pressões medidas nas células no modelo inicial na fase de descarga. ....	84
Figura 5.23 – Tensões totais verticais ao nível das células (320+300l). ....	85
Figura 5.24 - Tensões totais verticais ao nível das células (500+500l). ....	85
Figura 5.25 - Tensões totais verticais ao nível das células (1000+1000l). ....	86

Figura 5.26 – Pressões verticais. Comparação de valores numéricos (CP1 RS2) com valores medidos (CP1).....87

Figura 5.27 – Pressões verticais. Comparação de valores numéricos (CP2 RS2) com valores medidos (CP2).....87

Figura 5.28 – Valores nas células de pressão com a aplicação da força na horizontal. ....88

Figura 5.29 – Gráfico com os valores das pressões nas células de carga .....89



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Uso dos pneus em fim de vida como combustível derivado de pneus (TDF) (Adaptado de: EndOfLifeTires-FullReport).....	10
Tabela 3.1 – Características gerais do LVDT 1000. ....	46
Tabela 3.2 - Características gerais do LVDT 2000C.....	47



## **ABREVIATURAS**

ACAP- Associação Automóvel de Portugal;

ANIRP - Associação Nacional dos Industriais de Recauchutagem de Pneu;

APIB – Associação Portuguesa dos Industriais de Borracha;

ELT - Pneus em fim de vida;

ELV - Pneus usados de veículos em fim de vida útil;

EU – Estados Unidos;

EU – União Europeia;

IRSG - International Rubber Study Group;

MBB – Misturas Betuminosas com Borracha;

SGPU - Sistema Integrado de Gestão de Pneus Usados;

TDA - Agregado Derivado de Pneus.

TDF - Combustível derivado de pneus;

UT – Pneus Usados;

Valorpneu - Sociedade de Gestão de Pneus, Lda;



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

O presente estudo enquadra-se na Unidade Curricular Dissertação/Projeto/Estágio (DIPRE), do 2º ano do Curso de Mestrado em Engenharia Civil – Ramo de Estruturas, do Departamento de Engenharia Civil (DEC), do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Trata-se de um trabalho desenvolvido durante um estágio curricular realizado no Laboratório de Estruturas de Departamento de Engenharia Civil, orientado e supervisionado pelo Professor Engenheiro José Filinto Castro Trigo.

O presente relatório de estágio está centrado num modelo físico de um muro de suporte de terras com pneus, à escala reduzida, já objeto de estudo em trabalhos integrados nos cursos de Mestrado (Magalhães, 2014) e de Licenciatura em Engenharia Civil (Fonseca A., Santos R., 2016), de anos anteriores.

Realizou-se uma revisão bibliográfica sobre o tema, ensaiaram-se diferentes geometrias alternativas da solução de reforço e diferentes configurações de carregamentos. Procedeu-se às respetivas modelações numéricas com o recurso ao programa de cálculo automático, com formulação por elementos finitos, RS2, da Rocscience.

O modelo físico foi instrumentado com células de pressão instaladas no solo de aterro, próxima da base, e com diferentes transdutores de deslocamentos, posicionados em dois alinhamentos.

Os resultados da monitorização foram cruzados com os obtidos com o programa de cálculo automático RS<sup>2</sup>, o que permitiu a calibração do modelo numérico.

Numa primeira fase, consideraram-se dois níveis de reforço do modelo e o seu carregamento com uma sobrecarga, constituída por dois depósitos cheios de água. Em seguida, foi retirado o nível superior do reforço e aplicou-se a sobrecarga vertical referida. Numa terceira fase considerou-se esta última geometria e, para além da sobrecarga vertical, aplicou-se uma força horizontal ao nível da base dos depósitos.

Os temas abordados neste relatório foram estruturados em cinco capítulos, para além de a presente Introdução.

## CAPÍTULO 1

No Capítulo 2 apresenta-se uma breve revisão bibliográfica sobre a constituição e a produção de pneus, a situação atual relativamente aos pneus em fim de vida, os respetivos sistemas de gestão e as múltiplas soluções de reciclagem ou de reutilização.

No Capítulo 3 descrevem-se os modelos físicos à escala reduzida, que foram caindo em desuso face ao aparecimento e ao aperfeiçoamento de programas de cálculo automático. Identifica-se a constituição do modelo físico inicial, as alterações feitas à sua geometria e apresenta-se a instrumentação nele instalada.

No Capítulo 4 aborda-se o programa de cálculo automático *Phase2*, da *RocScience*, descrevendo-se as modelações numéricas realizadas.

No Capítulo 5 apresenta-se uma comparação dos resultados obtidos com a instrumentação do modelo físico com os correspondentes à modelação numérica.

No Capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões e recomendações para desenvolvimentos futuros.

## CAPÍTULO 2

### PNEUS EM FIM DE VIDA

#### 2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

No início do século XIX surge a máquina a vapor, sendo usada para mover não apenas barcos, mas também veículos. Veículos constituídos, na sua maioria, de rodas de aros de ferro e pneus de madeira.

A invenção do pneu foi ganhando diversas formas até chegar à fórmula final.

Em 1839 Charles Goodyear acidentalmente deixa cair enxofre em uma amostra de borracha que estava a ser aquecida, estava assim criado o processo da vulcanização da borracha. Com este processo foi descoberto um material mais resistente e elástico, cuja procura multiplicou-se por todo o mundo.

Já em 1845, Robert William Thomson, engenheiro civil, inventou o pneu, demonstrando que uma roda revestida com borracha com ar no seu interior reduziria as derrapagens e o barulho das carruagens (Santos, 2005). No entanto, esta invenção teve pouca utilidade prática e caíria no esquecimento (Santos, 2005).

Só em 1888, John Boyd Dunlop, reinventa o pneu, desta vez aplicado às bicicletas. A reinvenção de Dunlop com a adaptação do pneu às bicicletas fez despertar o interesse pela evolução do pneu. Alguns anos mais tarde, em 1895, Edward Michelin foi o primeiro a adaptar o pneu a um veículo a motor, uma vez que até então era só utilizado em bicicletas. Já em 1946, a empresa Michelin vem revolucionar a concepção do pneu, quando inventou e patenteou o pneu designado como pneu radial (Campos, 2006).

Os pneus ficaram a ter uma altura de secção mais baixa, bem como uma faixa de rodagem mais larga, permitindo assim uma melhor durabilidade. As características externas do pneu não mudaram sensivelmente desde o pneu radial, contudo, internamente a evolução teve um crescimento exponencial até aos dias de hoje, tendo essa evolução como finalidade o melhoramento do seu desempenho, durabilidade e qualidade ambiental (Shumlman, 2004).

A invenção do pneu radial e a sua evolução, aliadas ao desenvolvimento económico e social, propiciaram o aumento da produção mundial de pneus, que evoluiu exponencialmente, chegando ao ponto de tornar o pneu um resíduo mundial.

Quando o pneu não pode ser mais reutilizado, esses passam então à fase de final de vida. Ao chegarem a essa fase, os pneus são chamados de pneus-resíduo, pneus em fim de vida ou ainda pneus inservíveis.

A maior dificuldade na gestão de pneus em fim de vida é resultante da disposição ilegal do material.

Pneus que não possuem mais condições de recuperação são abandonados em qualquer lugar, o que constitui um problema ambiental e de saúde pública.

Centenas de milhões de pneus, o equivalente a milhões de toneladas de borracha, são descartados anualmente sem nenhum controle em todo o mundo.

Quando abandonados em locais inadequados, os pneus em fim de vida servem como local para procriação de mosquitos e outros vetores de doenças, ainda representam um risco constante de incêndio e, quando dispostos em terrenos ao ar livre, segregam um óleo que se infiltra e contamina o lençol freático.

## **2.2 SITUAÇÃO ATUAL NO MUNDO**

Um pneu é considerado no final da sua vida útil quando já não pode ser utilizado em veículos (depois de ter sido recauchutado ou regravado). Todos os pneus resultam em pneus em fim de vida (ELT). No entanto, a maior parte dos ELTs resultam de pneus de carro e caminhão.

De acordo com IRSG (International Rubber Study Group) a produção global de pneus é estimada em 1,5 bilhões de unidades.

Nos últimos 17 anos (Figura 2.1), as taxas de recuperação de pneus em fim de vida aumentaram bastante na Europa, Japão e EUA. Ao mesmo tempo, o custo da reciclagem para o consumidor diminuiu devido ao aumento da eficiência na gestão. Esta mudança mostra que os produtos derivados dos pneus em fim de vida podem legitimamente ser reconhecidos como uma matéria-prima secundária valiosa ou um combustível alternativo.

Em 2010, a Europa enfrentou o desafio de gerir, de uma forma ambientalmente correta, cerca de 3,3 milhões de toneladas de pneus usados (incluindo pneus para recauchutagem e reutilização / exportação) (Etrma,2011), a mesma quantidade de 2008 e acima de 2.2% comparado com 2009 (Etrma,2011).

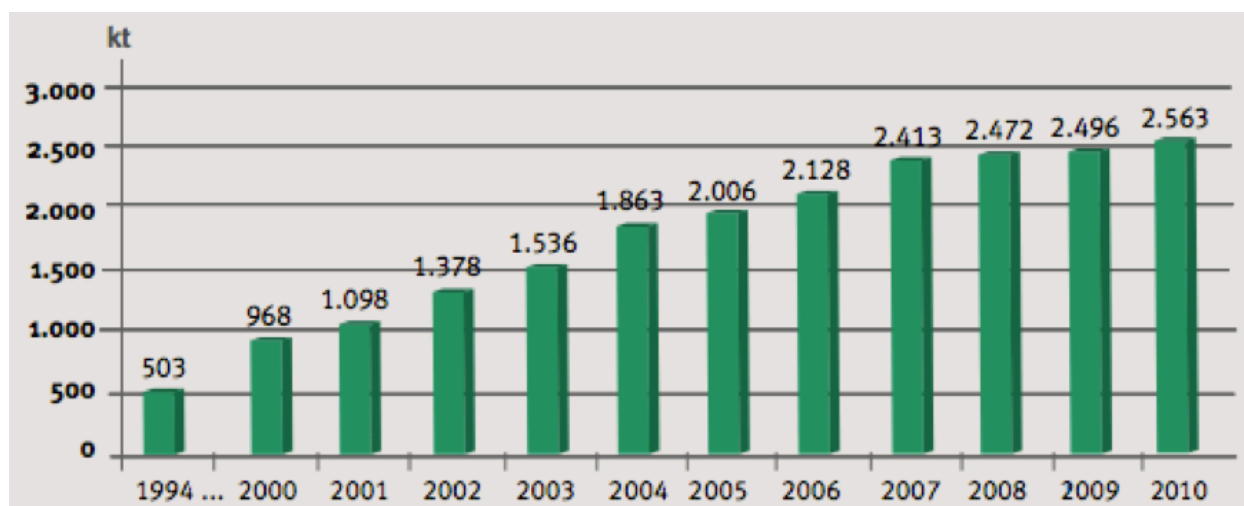


Figura 2.1 – Evolução da recuperação dos pneus em fim de vida nos últimos 17 anos (www.etrma.org).

Pode-se concluir que cerca de 2,7 milhões de toneladas de pneus de fim de vida permaneceram no mercado da UE para recuperação e reciclagem. Isto representa um aumento de cinco vezes das quantidades recuperadas nos últimos 17 anos.

Em 2015, cerca de 3,87 milhões de toneladas de pneus usados foram geridos de forma ambientalmente correta. Isso representa um aumento de 2,3% em relação ao ano de 2014. Após a triagem dos dados dos pneus destinados a reuso ou recauchutagem, estima-se que 3.19 milhões de toneladas de pneus em fim de vida (ELTs) fossem tratadas (Etrma,2015).

Este fluxo de materiais entrou em uma variedade de aplicações de reciclagem, obras públicas e engenharia civil ou foi usado como um substituto de combustível em fornos de cimento, caldeiras e centrais elétricas (Etrma,2011).

Na Europa, o custo anual estimado para a gestão dos pneus em fim de vida é estimado em 600 milhões de euros.

Além disso, a UE tem milhões de pneus usados que foram ilegalmente despejados. A eliminação inadequada de Pneumáticos pode, em alguns casos, representar uma ameaça potencial Saúde (risco de incêndio, abrigo para roedores ou outras pragas ...) e aumentar os riscos ambientais.

A estimativa atual para esses armazenamentos históricos em toda a UE alargada é de 5,7 milhões de toneladas (Etrma,2011). Em última análise, a melhoria do desempenho do negócio de pneus de vida deve atenuar-se a favor de uma abordagem mais eficaz para combater os armazenamentos históricos.

A estimativa anual para pneus usados de veículos em fim de vida útil (ELV) aumenta a 327 000 toneladas, o que representa cerca de 10% dos pneus usados anuais (Etrma,2011).

Desde 1996, mais de 24 milhões de toneladas de pneus em fim de vida (Etrma,2011) foram recuperados através de energia ou material de recuperação. Isto levou a um declínio considerável nos aterros ao longo do tempo, um fenômeno que tem sido acelerado a partir de 2000, na sequência da aplicação da Diretiva relativa aos Aterros e devido à iniciativa da indústria de estabelecer esquemas nacionais de Responsabilidade do Produtor.

Como resultado, apenas 4% (Figura 2.2) dos pneus usados são incluídos hoje em aterros ou têm destinos de recuperação desconhecidas enquanto a reciclagem, a recuperação, a reutilização e a recauchutagem agora contribuem para um substancial 96% da recuperação de pneus usados (Etrma,2011).

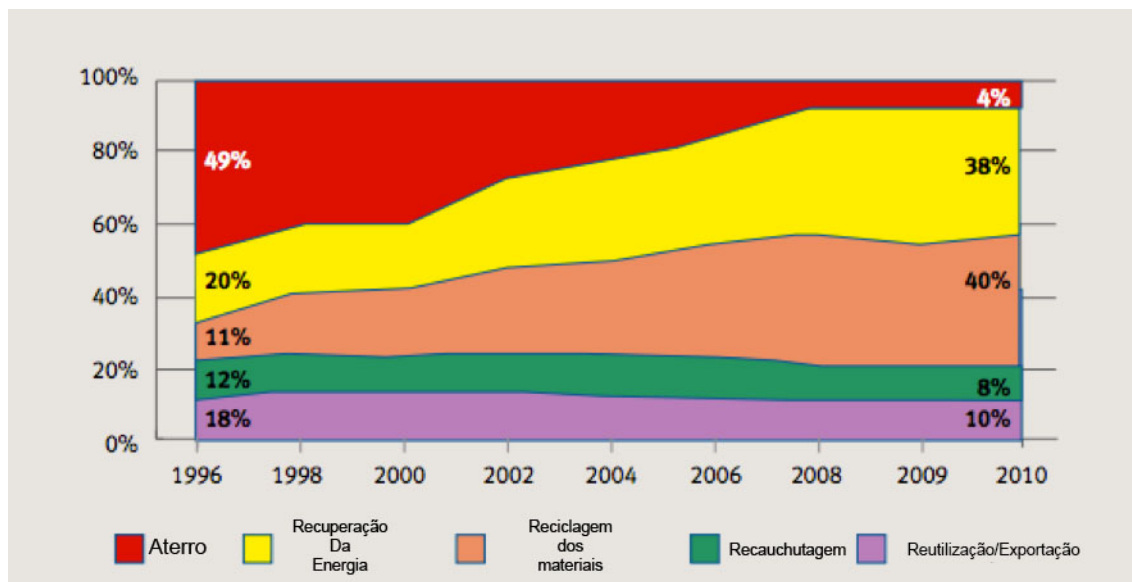


Figura 2.2 – Recuperação dos pneus em fim de vida (Adaptado de: [www.etrma.org/](http://www.etrma.org/)).

Na última década, a indústria de pneus, os concessionários e os operadores de pneus em fim de vida melhoraram substancialmente a utilização dos ELT.

A Europa construiu uma experiência real de três tipos de regimes de gestão dos ELT, ou seja, o modelo muito limitado, modelo de mercado livre e modelo de responsabilidade do produtor. A rápida melhoria do desempenho da gestão dos pneus em fim de vida foi alcançada através de uma implantação sustentada do modelo de responsabilidade do produtor.

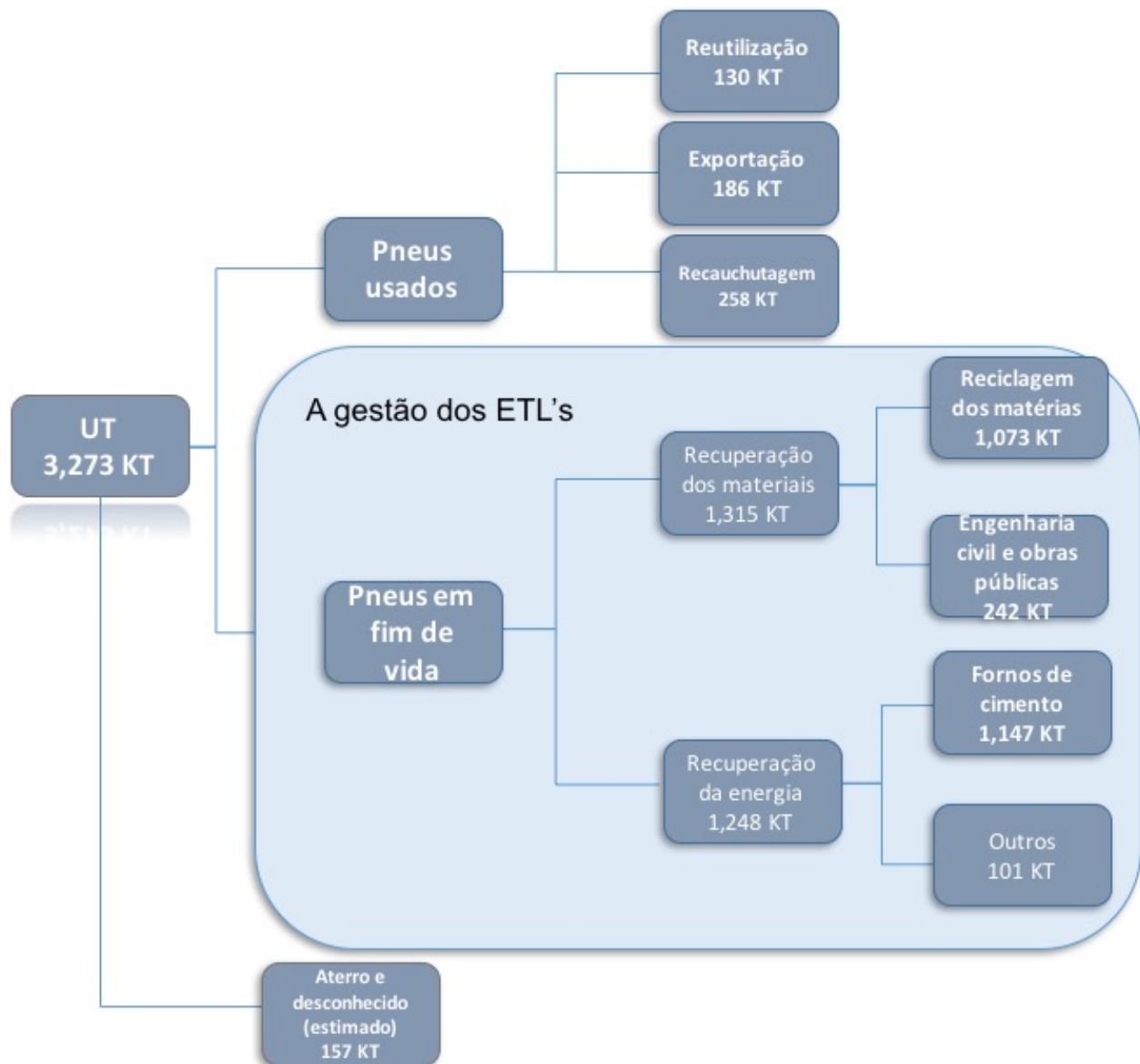


Figura 2.3 – A gestão dos pneus em fim de vida na Europa em 2010 (Adaptado de: [www.etrma.org/](http://www.etrma.org/)).

Uma observação interessante em 2010 (Figura 2.3) é a mudança na tendência, isto é, o crescimento na recuperação de material (+ 10%) e na recuperação de energia (-3%). Em números, isso significa que 1,3 milhão de toneladas de ELTs foram para material de recuperação e 1,2 milhões de toneladas na recuperação de energia (Etrma,2011).

Em comparação com as subidas de UT, a recuperação de material é agora a principal via de recuperação (40%), seguida de recuperação de energia (38%) (Etrma,2011).

Dentro da recuperação de material, reciclagem de ELTs como granulado de borracha de pneu e pó em várias aplicações é o percurso de recuperação principal (80%), seguida pela utilização de pneus em fim de vida em aplicações de engenharia civil e obras públicas (18%). No que se refere à recuperação de energia,

o principal utilizador de resíduos de ELT continua a ser a indústria de cimento (92% em volume), enquanto as centrais de aquecimento e de energia urbana absorvem o restante (Etrma,2011).

### 2.2.1 Sistema de gestão de pneus em fim de vida na Europa

Os Estados-Membros da UE têm de estar em conformidade com a legislação da UE na transposição da legislação local. São livres de definir iniciativas nacionais para atingir os objetivos da UE.

Em relação ao desenvolvimento das políticas de gestão de resíduos a nível nacional, a Diretiva relativa ao aterro de resíduos tem sido um principal responsável pela definição dos sistemas de gestão dos pneus em fim de vida na Europa.

Os fabricantes de pneus também estão a enfrentar uma crescente pressão ambiental do público em geral e de outras partes interessadas em relação ao despejo ilegal e ao armazenamento histórico.

Por todas estas razões, é do interesse da indústria do pneumático continuar a ser proactivo e assumir responsabilidades coletivamente para pneus de fim de vida.

Hoje, dentro da EU (Figura 2.4) existem três sistemas diferentes para a gestão de pneus de fim de vida:

- Responsabilidade do produtor
- Sistema fiscal
- Sistema de livre mercado

Alguns países estão atualmente em processo de mudança de um sistema para outro ou recentemente movido para um esquema de Responsabilidade do Produtor.

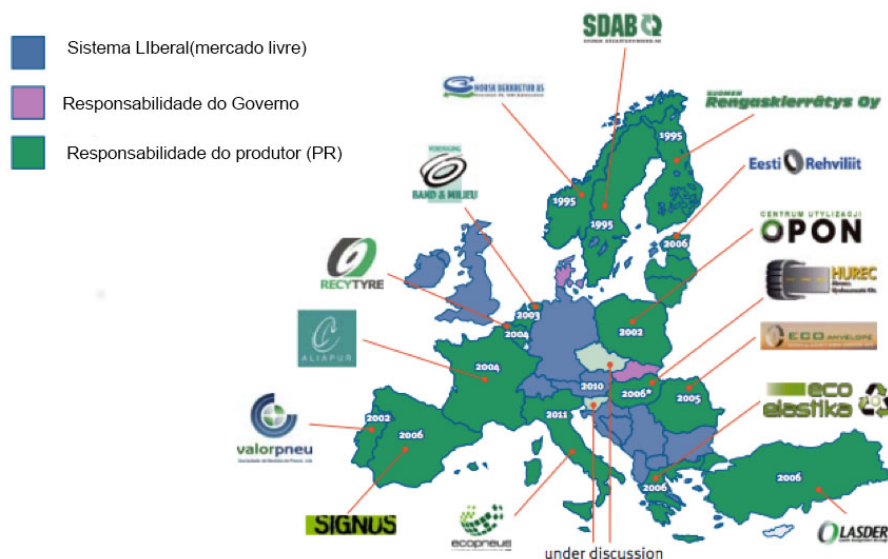


Figura 2.4 – As empresas de gestão dos pneus em fim de vida implementação em cada país (Adaptado de: [www.etrma.org/](http://www.etrma.org/)).

Em Itália, a Ecopneus, uma organização de gestão de ELT, começou a funcionar a partir de 7 de Setembro de 2011 em um regime coletivo de relações públicas, que substituiria o antigo sistema italiano de livre mercado. Em termos de ocorrência de UT, o mercado italiano é o terceiro mais importante na Europa, atrás da Alemanha e do Reino Unido.

Na República Checa, a Associação dos Produtores e Importadores de Pneus da República Checa foi criada em 2011 e criará um esquema coletivo de responsabilidade do produtor, que pode iniciar as suas operações em 2013.

Os pneus em fim de vida podem ser uma fonte de combustível de baixo custo quando um grande consumidor de combustível, como uma central elétrica ou fábricas de cimento. Eles também podem ser facilmente processados para Projetos de construção. Substituindo ELTs em vez de Novas matérias-primas reduzem as consequências ambientais e Custos econômicos (Figura 2.5), tais como:

- Exploração e extração de combustíveis fósseis e outras matérias-primas virgens Materiais, e o impacto associado ao uso da Terra
- Requisitos de transporte (como os pneus são geralmente abundantes em toda parte)
- A maioria ou todos os requisitos de processamento para muitas aplicações (Como os pneus podem muitas vezes ser usados inteiros ou retalhados).

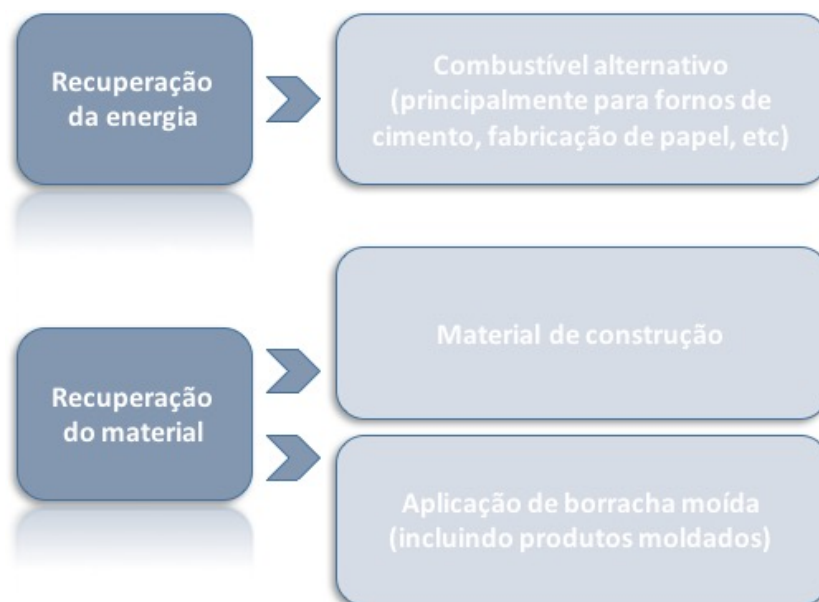


Figura 2.5 – Usos atuais para os pneus em fim de vida (Adaptado de: EndOfLifeTires-FullReport).

## Recuperação de energia

O combustível derivado de pneus (TDF), uma das principais opções para ELTs, é utilizado principalmente em fornos de cimento, mas também em estações, fábricas de celulose e papel, siderúrgicas e caldeiras. Na Europa, o setor de cimento é o principal uso do TDF.

Os fornos são cada vez mais equipados para usar ELTs como combustível suplementar e ainda estar em conformidade com o Normas de emissão atmosférica. Os pneus têm um elevado conteúdo e são uma fonte de energia igual ou melhor a muitos outros combustíveis sólidos. Isto, juntamente com o aumento dos custos de energia e maior consciência ambiental nos últimos anos, tem levado a um aumento no uso de TDF.

A infraestrutura existe, e com apoio e reconhecimento suficientes de TDF como uma alternativa viável, o desenvolvimento da indústria tem potencial significativo.

O TDF é atualmente o maior uso para ELTs nos Estados Unidos e no Japão, e a recuperação da energia é aproximadamente igual à recuperação material na Europa ocidental e os EU (Tabela 2.1).

Os fatores que afetam o uso de pneus em fim de vida incluem:

- A estrutura de recuperação e gestão do ELT no local
- Normas e restrições à utilização e eliminação de ELT
- Infraestrutura disponível para permitir reutilização
- Fiabilidade da oferta
- Necessidades e custo de transportes.

Tabela 2.1 – Uso dos pneus em fim de vida como combustível derivado de pneus (TDF) (Adaptado de: EndOfLifeTires-FullReport).

	Total ELTs Excluindo exportação e recauchutagem	TDF uso	Instalações com utilização TDF
Europe	250 Milhões	41% (2006)	Fornos cimento
Japan	80 Milhões	70% (2006)	Fornos cimento, fábrica de papel, fábrica de pneus
US	292 Milhões	53% (2005)	Fornos de cimento, fábrica de papel/celulose, caldeiras

## Recuperação do material

- Usos na engenharia civil

Pneus inteiros ou retalhados são usados com sucesso em uma variedade de projetos de engenharia civil tais como terraplenagens, aterro para paredes, drenagem control / barreiras de escoamento de águas pluviais, barreiras de choque e pára-choque.

Os Pneus são materiais excelentes para tais usos porque são leves, permeáveis, bons isoladores, choque absorvente, absorvente de ruído e durável.

Os ELTs também podem ser convertidos em borracha moída que pode então ser usada para asfalto modificado com borracha (reduzindo o ruído do tráfego), pistas de corrida, campos desportivos, cobertura do solo sob parques infantis, produtos de borracha moldada e cobertura vegetal em aplicações de paisagem. A borracha moída é produzida quer por moagem ambiente quer por moagem criogénica (congelamento), a última produzindo partículas mais finas utilizando azoto líquido para arrefecer os pneus antes do processamento.

- Borracha moída

É provável que o uso de borracha no solo se expandirá com pesquisa e desenvolvimento.

Por exemplo, métodos de borracha reciclada com polímeros para criar produtos moldados estão a ser melhorados, assim como o uso de borracha no asfalto em climas variados.

Os pavimentos de asfalto fabricados com ELTs são de uso comum no mundo. Maior durabilidade e menor ruído são as suas propriedades características benéficas.

Nos EUA, a borracha é misturada com alcatrão para modificar favoravelmente a propriedades do alcatrão. Este mercado expandiu-se nos Estados Unidos e Europa, e espera-se que cresça no futuro. Por exemplo, várias províncias canadenses estão conduzindo pesquisas que podem levar a uma maior expansão desse mercado.

O Grupo de Pesquisa de Borracha de Asfalto do Japão liderou as pesquisas e desenvolvimento em asfalto modificado com borracha.

Na maioria dos usos, os pneus apresentam um baixo risco de poluição, quando comparado com outros materiais alternativos. O uso de ELTs pode ajudar a minimizar o impacto ambiental de um projeto. Em alguns casos pode ocorrer lixiviação, no entanto isso não é relatado como um problema generalizado.

## 2.3 SITUAÇÃO EM PORTUGAL

Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril, estabelece os princípios e as normas aplicáveis à gestão de pneus e pneus usados.

Este presente decreto-Lei tem como objetivos a prevenção da produção destes resíduos, a recauchutagem, a reciclagem e outras formas de valorização, de forma a reduzir a quantidade de resíduos a eliminar, bem como a melhoria do desempenho ambiental de todos os intervenientes durante o ciclo de vida dos pneus. É aplicável a todos os pneus colocados no mercado nacional e a todos os pneus usados, de acordo com as definições constantes das alíneas a) e b) do artigo 2.º:

- a) Pneus: os pneus utilizados em veículos motorizados, aeronaves, reboques, velocípedes e outros equipamentos, motorizados ou não motorizados, que os contenham;
- b) Pneus usados: quaisquer pneus de que o respetivo detentor se desfaça ou tenha a intenção ou a obrigação de se desfazer e que constituam resíduos na aceção da alínea a) do artigo 3.º do Decreto-Lei n.º 239/97, de 9 de Setembro, ainda que destinados a reutilização (recauchutagem).
- c) Pneu recauchutado: o pneu usado que é objeto de processo industrial, de acordo com as especificações técnicas aplicáveis, com vista à sua reutilização, sendo de novo colocado no mercado. (Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril)

Em conformidade com o Decreto-Lei n.º 111/2001, constituem como princípios fundamentais de gestão de pneus e de pneus usados, a prevenção da produção destes resíduos, aliada ao aumento da vida útil dos pneus, a promoção da recauchutagem e a implementação e desenvolvimento de sistemas de reciclagem e de outras formas de valorização de pneus usados.

Nos termos do mesmo Decreto-Lei do artigo nº5, é proibida a combustão de pneus sem recuperação energética, nomeadamente a queima a céu aberto e o abandono de pneus usados, bem como a sua gestão por entidades não autorizadas e ou licenciadas para o efeito.

### 2.3.1 Sistema de Gestão

O produtor de pneus novos é o responsável pela recolha, transporte e destino final adequado dos pneus usados, devendo esta responsabilidade ser transferida para uma entidade gestora, nos termos do n.º 2 do artigo 7.º do Decreto-Lei n.º 111/2001.

A responsabilidade do produtor pelo destino adequado dos pneus usados só termina mediante a entrega dos mesmos a uma entidade devidamente autorizada e ou licenciada para a sua recauchutagem, reciclagem ou outras formas de valorização.

De acordo com a definição da alínea d) do artigo 2.º do Decreto-Lei n.º 111/2001, de 6 de Abril, o produtor é: qualquer entidade que fabrique, importe ou introduza pneus novos ou em segunda mão no mercado

nacional, incluindo as que fabriquem, importem ou comercializem veículos, aeronaves ou outros equipamentos que os contenham.

Com o objetivo de dar cumprimento aos princípios e às normas definidas, foi licenciada a entidade gestora Valorpneu - Sociedade de Gestão de Pneus, Lda., para a qual os produtores devem transferir a responsabilidade pela gestão dos pneus usados que colocam no mercado. No entanto, a responsabilidade do produtor pelo destino adequado dos pneus usados só termina mediante a entrega dos mesmos, por parte da entidade gestora, a uma entidade devidamente autorizada/licenciada para a sua recauchutagem, reciclagem ou outras formas de valorização.

A VALORPNEU é uma sociedade sem fins lucrativos por quotas, com o capital repartido pela ACAP, ANIRP e APIB e tem por objetivo a organização e gestão do sistema de recolha e destino final de pneus usados.

Segundo a Valorpneu a ACAP- Associação Automóvel de Portugal, é uma associação de utilidade pública, sem fins lucrativos, que representa a totalidade da atividade comercial do sector automóvel. Integra igualmente nos seus associados os produtores de pneus. A atividade desta associação abrange a importação, o comércio e o serviço pós-venda de veículos automóveis, máquinas agrícolas e industriais, pneus, peças e acessórios, reboques de campismo e caravanas, motociclos e outros sectores ligados à atividade do comércio de transporte. (Valorpneu)

A ANIRP - Associação Nacional dos Industriais de Recauchutagem de Pneu, é uma associação sem fins lucrativos, que representa como seus associados as indústrias de recauchutagem de pneus que operam no território nacional. (Valorpneu)

A APIB – Associação Portuguesa dos Industriais de Borracha, é uma associação sem fins lucrativos, que tem como associados as indústrias de borracha cuja atividade compreende o fabrico de pastas ou misturas de borracha e outros elastómeros, o fabrico de artefactos incluindo calçado de borracha vulcanizada e componentes e o fabrico de pneus e câmaras-de-ar. (Valorpneu)

Os Pneus abrangidos pelo Sistema Integrado de Gestão de Pneus Usados (SGPU) gerido pela VALORPNEU são todos os pneus comercializados em Portugal, os quais foram objeto da seguinte segmentação:

- pneus de veículos ligeiros de passageiros/turismo;
- pneus de veículos 4x4 on/off road;
- pneus de veículos comerciais;
- pneus de veículos pesados;
- pneus de veículos agrícolas (diversos);

- pneus de veículos agrícolas (rodas motoras);
- pneus de veículos industriais (com diâmetro de jante compreendido entre 8" e 15");
- pneus maciços;
- pneus de veículos de engenharia civil (até à dimensão 12.00-24");
- pneus de veículos de engenharia civil (dimensões iguais ou superiores a 12.00-24");
- pneus de motos (com cilindrada superior a 50cc);
- pneus de motos (com cilindrada até 50cc);
- pneus de aeronaves;
- pneus de bicicletas.

O SGPU é um sistema articulado de processos e responsabilidades (Figura 2.6) que visa o correto encaminhamento dos pneus em fim de vida, promovendo a recolha, separação, retoma e sua valorização. Este sistema é financiado pela cobrança de um Ecovalor, discriminado na fatura aquando da venda de pneus. (Valorpneu, 2013)

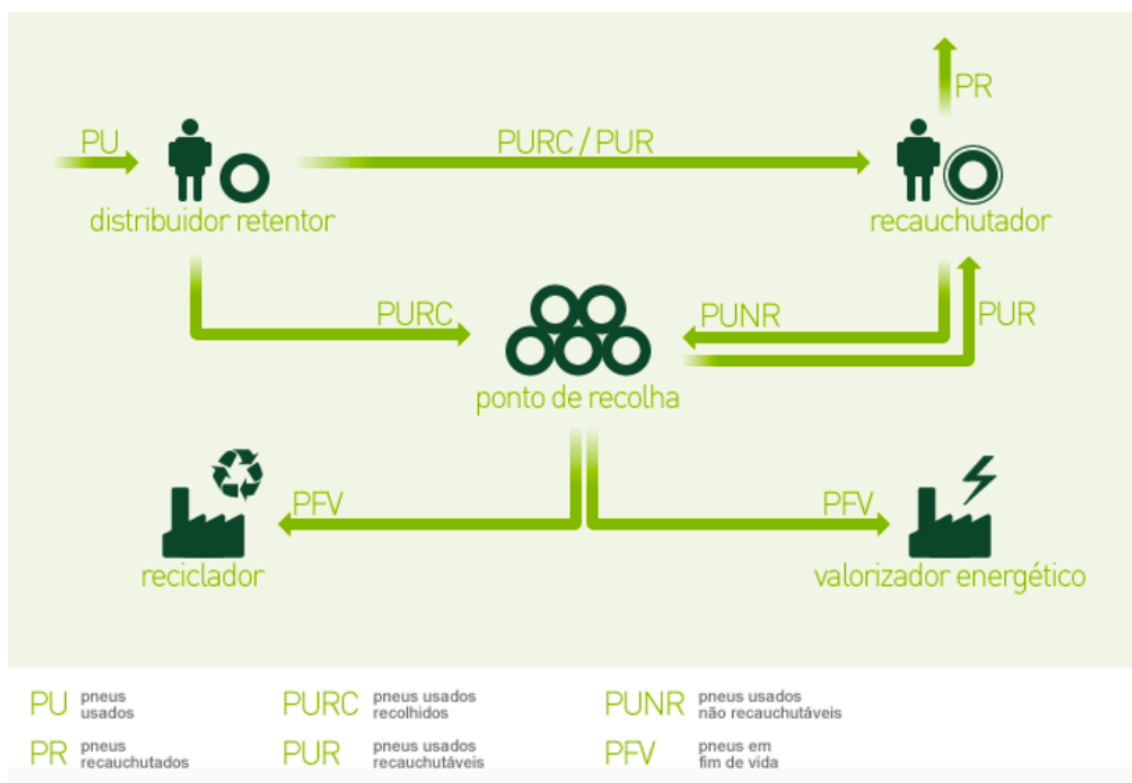


Figura 2.6 – Modelo de funcionamento do SGPU (Valorpneu,2013)

O artigo 9.º do Decreto-Lei n.º 43/2004, de 2 de Março, estabelece as seguintes regras para a comercialização e recolha de pneus usados:

- a) Aquando da comercialização de pneus, os produtores e distribuidores discriminam, num item específico a consagrar na respetiva fatura, o valor correspondente à contrapartida financeira fixada a favor da entidade gestora.
- b) Os distribuidores não podem recusar-se a aceitar pneus usados contra a venda de pneus do mesmo tipo e na mesma quantidade, devendo remeter os mesmos para recauchutagem ou para qualquer operador legalizado para a gestão de pneus usados.
- c) A recolha de pneus usados, mediante entrega nos locais adequados, é feita sem qualquer encargo para o detentor.
- d) Os pneus usados recolhidos deverão ser armazenados em locais devidamente autorizados ou licenciados em consonância com a legislação aplicável.

No SGPU, os Pontos de Recolha da rede são locais de armazenamento temporário de PU, os quais funcionam como um “reservatório” a montante dos valorizadores. Estes operadores são a primeira face visível do SGPU e aceitam livres de encargos quaisquer tipos de pneus provenientes dos detentores (distribuidores, particulares, oficinas, etc.).

A rede de recolha da Valorpneu é constituída por 40 Pontos de Recolha no Continente, 8 Pontos de Recolha na Região Autónoma dos Açores e 1 Ponto de Recolha na Região Autónoma da Madeira.

Os pontos de recolha aceitam todos os pneus usados, desde que cumpram determinadas condições, tais como: os pneus em fim de vida não podem apresentar contaminações, e deve ser apresentada toda a documentação necessária para o efeito, como: a guia de acompanhamento de resíduo; fotocópia do cartão de contribuinte e a ficha de caracterização de origens. Posto isto, os pontos de recolha ficam com os pneus em fim de vida, não tendo qualquer encargo financeiro para os seus proprietários. (Valorpneu)

Por fim, os Recicladores e Valorizadores Energéticos fecham o ciclo do SGPU, recebendo os pneus em fim de vida provenientes dos pontos de recolha dando-lhe um destino adequado e transformando-os em granulado de borracha (recicladores) ou em energia (valorizadores energéticos).

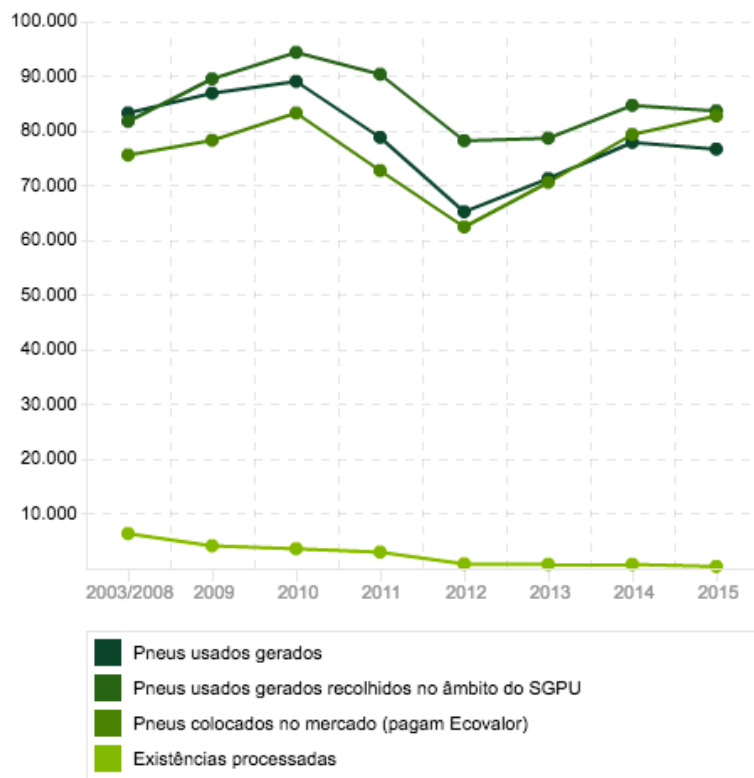


Figura 2.7 – Pneus colocados no mercado, gerados, recolhidos (Valorpneu)

O ano de 2016 foi um ano de consolidação para a Valorpneu. A recolha e valorização de pneus usados situou-se ao nível de 2015, ano em que se registaram 84 mil toneladas de pneus tratados (Figura 2.8). Em 2016, foram recicladas 47 mil toneladas de pneus, 24 mil toneladas tiveram como destino o aproveitamento energético e os restantes quantitativos foram submetidos à operação de recauchutagem ou reutilizados (Figura 2.9).

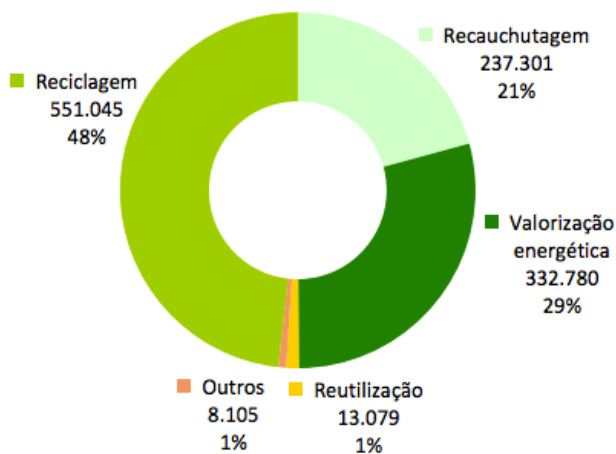


Figura 2.8 – Destino dos pneus recolhidos pelo SGPU – 2003 a 2015 (Valorpneu).

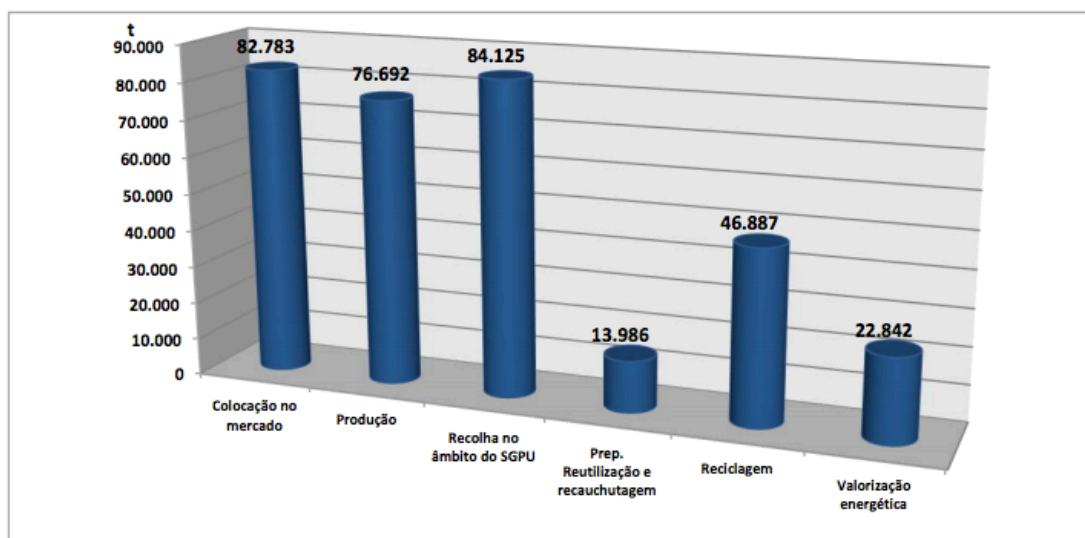


Figura 2.9 – Gestão dos pneus usados 2015 (Valorpneu).

## 2.4 SOLUÇÕES DE REUTILIZAÇÃO

Quando os pneus chegam ao fim da sua vida útil, significa que já não se encontram aptos para exercer a sua função.

Os recicladores utilizam os pneus usados (Figura 2.10) como matérias-primas, interessando-lhes fundamentalmente a borracha vulcanizada, sendo que depois do processamento que efetuam, apresentam como produtos finais: têxtil, aço e granulado de borracha com diferentes granulometrias, o qual é vendido para diversas aplicações, tais como: pavimentos desportivos, recintos diversos, parques infantis, MBB – Misturas Betuminosas com Borracha, etc.

O granulado de borracha proveniente da indústria da reciclagem de pneus continuou a ser maioritariamente aplicado nos campos de relva sintética e em pavimentos diversos, sendo exportado cerca de 44%. (valorpneu)

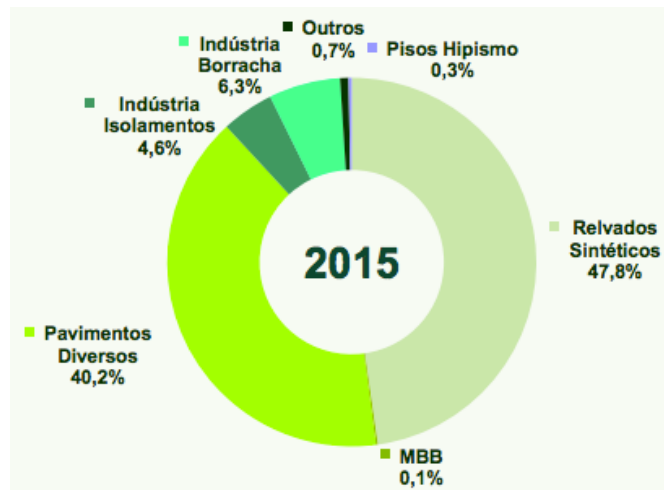


Figura 2.10 – Reciclagem dos pneus (Valorpneu).

### 2.4.1 Alcatrões de borracha



Figura 2.11 – Alcatrão de borracha (www.greenme.com.br).

O alcatrão de borracha (Figura 2.11) é feito a partir do pneu triturado em pedaços bem finos. Esse pó feito de borracha é então misturado ao alcatrão. Por fim são adicionadas as britas e o alcatrão ecológico está pronto para o uso. Esta adição de borracha no alcatrão permite realizar ruas e estradas caracterizadas por uma elevada durabilidade, baixo ruído e aderência de travagem.

### 2.4.2 Pavimentos desportivos

Uma vez triturado os pneus de borracha, eles podem ser usados como preenchimento de campos de futebol com grama artificial, pistas de atletismo, pavimentações antitraumas e superfícies equestres

(Figura 2.12). A propriedade drenante do material, combinada com a capacidade elástica para absorver impactos fazem o grânulo deste tipo de borracha particularmente adequado para tais utilizações.



Figura 2.12 – Pavimento desportivo com pneus triturado ([www.greenme.com.br](http://www.greenme.com.br)).

### 2.4.3 Materiais para isolamento sonoro

O material obtido com a reciclagem de pneus é comumente usado para produzir painéis isolantes de som, tapetes anti-derrapantes, membranas impermeabilizantes (Figura 2.13), materiais anti-vibrações e anti-sísmicos, particularmente apreciados pelas propriedades elásticas do material, o que garante proteção de segurança.



Figura 2.13 – Membranas ([www.greenme.com.br](http://www.greenme.com.br)).

### 2.4.4 Aplicação urbana

Um dos exemplos do uso de placas de borracha reciclada de pneus no campo do desenvolvimento urbano é o exemplo da sustentável da calçada portuguesa. (Figura 2.14)

## CAPÍTULO 2

A empresa Eco Solutions, que foi criada com o objetivo de proporcionar soluções técnicas inovadoras e economicamente viáveis, a partir da utilização do granulado de borracha derivado do pneu usado reciclado.

Pedro Marques e Susana Marques são os fundadores desta jovem empresa, que em pouco tempo conquistou o seu espaço no mercado nacional, através da comercialização de produtos a partir de materiais alternativos e ecologicamente diferenciadores.



Figura 2.14 – Calçada portuguesa (automotiverevista.com).

Esta empresa é apologista de manter a tradição nacional do uso da calçada portuguesa, mas podemos fazê-la numa vertente mais prática, segura e ecológica, aproveitando a borracha de pneu usado.

Aquilo que batizaram por Eco.Kalçada, que surge de uma ideia no âmbito do Prémio Inovação Valor Pneu 2009, concretizada em 2015 pela empresa.

É um produto inovador produzido a partir da junção de borrachas coloridas virgens ou recicladas com os granulados derivados do pneu usado.

Este produto, para além de inovadores, é economicamente mais barato que os materiais tradicionais, proporcionando ainda maior durabilidade, absorção do impacto, facilidade de limpeza, redução de vibrações e de lesões para os animais, facilidade de instalação e boa capacidade de drenagem.

O material de revestimento possui também a elasticidade suficiente para suportar as cargas e não comprometer a sua integridade assim como a resistência aos Ultravioletas (UV) e às intempéries. Substituição de todos os materiais tradicionais da calçada portuguesa por materiais com capacidade de amortecimento.

Os principais campos de aplicação são: passeios públicos, zonas de lazer, escolas e parques recreio de crianças sem brinquedos em altura, praças e Avenidas históricas; ciclovias; vias pedonais e envolventes de piscinas.

### 2.4.5 Engenharia Civil

O Departamento de Engenharia Civil e do Ambiente da Universidade de Dalhousie está a utilizar pneus reciclados para o fabrico de um novo tipo de agregado ambiental.

O Agregado Derivado de Pneus (TDA) é um material, com propriedades ideais para ser utilizado em projetos de Engenharia Civil, que aproveita um resíduo da indústria automóvel.

Todos os anos centenas de milhões de pneus são depositados em aterros, o que representa um perigo para a saúde pública pela sua capacidade de armazenamento de águas das chuvas, com o associado potencial de propagação de mosquitos.

Por outro lado, os aterros de pneus são um verdadeiro barril de pólvora ambiental pela sua inflamabilidade e possibilidade de libertação de poluentes para a atmosfera, solos e aquíferos.

Os materiais para construção resultantes da reciclagem daquele resíduo têm sido investigados desde os anos 80, tendo sido largamente utilizados nos últimos anos.

Um exemplo são os betumes borracha, betumes modificados com pó de borracha proveniente de pneus usados, cuja aplicação é cada vez mais frequente em obras rodoviárias.

Também o TDA tem sido exaustivamente estudado ao longo dos últimos anos, tendo sido melhorado sucessivamente o seu desempenho estrutural e durabilidade e reduzido substancialmente o seu custo de fabrico.

O tipo de Agregado Derivado de Pneus sintetizado pela Universidade de Dalhousie e atualmente fabricado pela empresa de reciclagem Halifax C&D Recycling Ltd, é um material leve capaz de aumentar a resistência dos solos, tendo igualmente excelentes capacidades drenantes. Possui também propriedades de atenuação de vibrações e de isolamento térmico.

Além disso é um material perfeitamente seguro do ponto de vista ambiental, por se tratar, essencialmente, de borracha vulcanizada.

Por essas razões a utilização de TDA tem enormes vantagens de aplicação em obras viárias geotécnicas e de drenagem.

A aplicação de misturas TDA-solo pode ser, no entanto, transposta para num leque alargado de projetos, incluindo fundações de edifícios e de obras de arte.

As aplicações mais comuns na Engenharia Civil incluem:

- material de enchimento de peso leve;
- drenagem em campo séptico;
- aterro em estradas;

- suporte de base de estrada;
- sistema de drenagem de gases em aterros sanitário;
- estabilizadores de encostas;
- controle de erosão, diques, barragens;
- isolante térmico e acústico;
- drenagem em aterro sanitário, etc.

O uso de pneus triturados em vez dos materiais de construção convencionais apresentam os seguintes benefícios: densidade reduzida, melhor propriedades de drenagem e, melhor isolamento térmico e acústico (BENSON, 1995).

## **Utilização de pneus em obras geotécnicas**

### **Muros de suporte de terras**

As estruturas de suporte de terras são obras de engenharia executadas com a finalidade de providenciar a estabilidade de maciços de terra ou de rocha.

A análise de uma estrutura de contenção consiste no estudo do equilíbrio do conjunto formado pelo maciço de solo ou rocha e a própria estrutura. Este equilíbrio é condicionado pelas características de resistência, de deformabilidade, de permeabilidade e pelo peso próprio desses dois elementos, além das condições que regem a interação entre eles (Costa, 2010).

A norma portuguesa NP EN 1997-1 Projeto Geotécnico. Regras gerais (Eurocódigo 7), define estruturas de suporte como “todos os tipos de muros e sistemas de sustimento nos quais existam elementos estruturais submetidos a esforços impostos pelo material suportado” e distinguem-se em três tipos: muros de gravidade, cortina e estruturas de suporte compósitas.

As estruturas de suporte de terras são bastante utilizadas em vários campos da engenharia civil, tais como rodovias, vias férreas, túneis, obras de proteção de taludes, estruturas hidráulicas, estruturas de irrigação até mesmo exploração espacial e estruturas de energia nuclear para não mencionar as paredes de proteção contra tsunamis.

#### **➤ Técnica de pneusol**

A técnica do Pneusol tem como finalidade a utilização de pneus em fim de vida, estes pneus não têm um destino adequado, isto é, são muitas vezes deixados ao abandono em locais inadequados. Esta técnica pode ser empregue em obras de engenharia civil, principalmente como estruturas de suporte, envolve, em regra, uma estrutura de gravidade, isto é, a sua estabilidade é assegurada pelo peso próprio. É uma técnica que é já uma realidade há várias décadas e em vários países. Pode-se considerar uma boa opção,

nomeadamente o baixo custo do material, a eficiência mecânica, o baixo custo de mão-de-obra e a preservação do meio ambiente.

Na Figura 2.15 apresenta-se uma imagem de um muro de suporte de terras realizado com esta tecnologia construtiva.



Figura 2.15 - Exemplo de um muro de suporte de terras construído com a técnica de pneusol  
([www.lins.sp.gov.br](http://www.lins.sp.gov.br)).

A tecnologia do Pneusol tira partido das características de dois materiais, solo e pneus, que funcionam em conjunto, formando assim um material com características melhoradas.

A ligação destes dois materiais faz com que seja possível utilizar solos com propriedades mecânicas mais fracas do que é, usualmente, exigido, por exemplo na materialização de aterros.

As grandes vantagens desta tecnologia aplicada a estruturas de suporte de terras são o uso de pneus em fim de vida e, ainda, a não necessidade de mão-de-obra qualificada, considerando-se uma técnica mais barata, comparando com a construção dos muros convencionais

Esta tecnologia passa pelo aproveitamento das capacidades resistentes do pneu, incluindo e compactando solo no seu interior, formando assim um novo material a partir do conjunto solo-pneu, com capacidades resistentes superiores à inicial, quer do solo, quer do pneu independentemente.

A construção de muros de pneus consiste na colocação de pneus no solo ligados entre eles através de arame ou de corda (figura 2.16), de forma a unir os pneus da mesma camada e entre camadas adjacentes. Usando a ligação com corda, o mais recomendado é o nó tipo “marinheiro” (Figuras 2.17) que tem a vantagem de, à medida que as solicitações aumentam, o nó ficar mais apertado. Os pneus são colocados

em camadas e preenchidos com solo, sendo compactado o seu interior com recurso a um martelo. Frequentemente, é colocada uma camada de papel na abertura de fundo dos pneus para evitar que o solo saia pela sua parte inferior, à medida que se realiza a compactação.

Os pneus podem ser utilizados inteiros, com um ou ambos os flancos cortados. Se caso o pneu seja utilizado inteiro ter-se-á mais dificuldade em compactar o solo que ficará incluído no pneu, resultando numa estrutura com mais vazios, mais permeável, mais deformável, menos coesa, com um peso específico inferior. Caso se opte por utilizar pneus com um ou os dois flancos cortados, conseguir-se-á uma melhor compactação do solo incluído no pneu, levando a uma estrutura mais coesa, de maior massa e, à partida, mais resistente.

Depois de efetuada a primeira camada é colocada uma nova camada no topo, repetindo o processo até se atingir a altura do muro desejada para o efeito. As sucessivas camadas devem ser posicionadas em quincôncio (Figura 2.16), de modo a obter uma ligação mais eficaz e menos espaços vazios, sendo estes últimos igualmente preenchidos com solo compactado. O solo tem como principal objetivo fornecer maior massa ao muro, permitindo contrariar os impulsos exercidos pelo solo a conter.

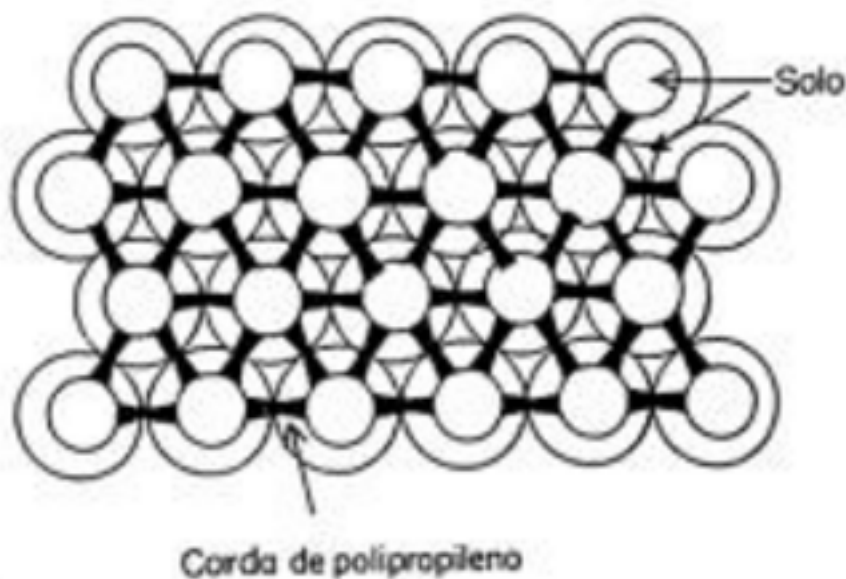


Figura 2.16 – Exemplo de ligação e posicionamento em quincôncio (www.ebah.com.br).



Figura 2.17- Nó tipo “marinheiro” (prof.augusto.zip.net).

Após construído o muro deve-se concretizar a proteção dos elementos que ficam à vista, quer por motivos estéticos quer pelo ataque sofrido pela borracha dos pneus quando expostos à luz solar.

Segundo Long (1993), um dos principais inconvenientes deste tipo de muros é o envelhecimento da borracha dos pneus que depende de fatores como os raios ultravioleta a luz e o calor que podem provocar o aparecimento de fissuras devido a uma decomposição da superfície da borracha. Caso o pneu esteja completamente enterrado este fenómeno já não acontece. E o outro fator é a acidez do solo com um pH na ordem de 1 temos ácidos fortes que destroem a borracha, devendo este fator ser devidamente controlado.

Para evitar a exposição direta da borracha a estes fatores, podem ser utilizados vários tipos de revestimentos como uma cobertura vegetal, geotêxtil ou mesmo betão projetado, entre outros, e ao mesmo tempo, conferindo alguma estética. Assim, tanto os pneus como os ligadores que os unem ficam protegidos dos ataques externos e a vida útil da estrutura não ficará comprometida.

A técnica da pneusol é uma estrutura capaz de suportar grandes assentamentos diferenciais por ser uma estrutura flexível e também é uma tecnologia que tira partido da facilidade e rapidez de execução, da construção faseada e facilidade de normalização, da possibilidade de utilização de um material de enchimento de qualidade inferior, da capacidade de construir estruturas em terra ou em água, estruturas arquitetonicamente mais apelativas, tira partido do benefício ambiental através de o consumo de um material incómodo, dos ganhos energéticos pela substituição de materiais usuais (betão ou aço, por exemplo) por um resíduo e não necessita de mão de obra especializada.

A utilização de pneus na construção de muros de suporte de terras (Figura 2.18) tem várias vantagens face aos muros convencionais. Além do ganho em termos ambientais, a utilização de pneus para a construção de muros de contenção é mais barata que a construção dos muros convencionais, podendo ser executados, mesmo sem formação especializada, seguindo um conjunto de orientações.



Figura 2.18 – Exemplo de um muro de suporte de terras (aconstrutoravion.blogspot.pt).

### ➤ Edifício Utopia

A Plako é uma empresa que se dedica ao desenvolvimento de soluções de software que tenham por base a infraestrutura da Internet.

Em 2010, decidiram deslocar a sua sede do centro de Braga para uma zona rural a poucos km, na Póvoa de Lanhoso, demonstrando que é possível continuar a crescer longe dos grandes centros urbanos.

Desde essa data que a Plako está localizada na Incubadora de Empresa de Ferreiros, naquela vila minhota, que foi instalada na antiga escola primária da freguesia. Mas o destino final da empresa tecnológica é outro: o edifício Utopia, uma infra-estrutura feita de raiz a partir do enchimento de 2000 pneus com terra, revestidos com uma combinação de argamassa, cal, palha, areia e latas de refrigerante usadas. Apoiado pela Câmara Municipal da Póvoa de Lanhoso, Quercus e Universidade do Minho, entre outros, o

projeto Utopia nasceu da vontade de uma empresa ligada à área das novas tecnologias de informação em dispor de umas instalações com o menor impacto possível no meio ambiente e no respeito pela biodiversidade do espaço.

O principal edifício do projeto Utopia (Figura 2.19) é composto por uma construção onde as paredes exteriores do edifício são construídas com recurso a pneus usados cheios de solo.

Esta técnica, desenvolvida na década de 70 pelo Eco-arquitecto americano Michael Reynolds, foi adaptada aos climas húmidos do norte do país, sendo que todo o edifício fica suspenso no ar através de 34 pilares para facilitar a circulação do ar e melhorar a eficiência energética das instalações. Esta mesma eficiência será avaliada através de investigação realizada pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

O edifício Utopia será construído com recurso a vigas e tábuas de madeira e, no topo deste, será colocado um extenso coberto vegetal que irá ajudar a minimizar o impacto visual do e ao nível dos acabamentos, o edifício irá contar com um revestimento em cortiça no seu exterior e um reboco à base de argila, no lado interior.

A estrutura principal de pneus, as paredes internas serão construídas a partir de uma investigação desenvolvida por Paulo Mendonça, do Departamento de Arquitetura da Universidade do Minho.

Este edifício será o primeiro do mundo a utilizar esta nova tecnologia que, para além de apresentar melhor desempenho no que se refere ao isolamento acústico e térmico, tem a vantagem de serem reutilizável.



Figura 2.19 – Edifício do projeto Utopia (utopia.plako.net).



## CAPÍTULO 3

### MODELO FÍSICO

#### 3.1 MODELOS FÍSICOS À ESCALA REDUZIDA

O recurso a modelos físicos desenvolvidos à escala reduzida foi caindo em desuso face ao aparecimento e ao aperfeiçoamento de programas de cálculo automático que possibilitam a modelação numérica de variados e complexos problemas de Engenharia Civil e Geotécnica. Os modelos físicos têm, contudo, um inegável carácter didático, que se entende dever ser privilegiado em escolas de ensino superior, para além de a sua utilidade na calibração de modelações numéricas e de permitir uma análise mais cuidada do comportamento de determinados detalhes de uma estrutura e do seu faseamento construtivo, por vezes dificilmente modelados com programas de análise numérica (Magalhães, 2014).

Estes modelos têm como objetivo conhecer o comportamento de estruturas reais a partir das conclusões obtidas da observação dos mesmos o que envolve o cumprimento de condições de semelhança.

Estas condições são, muitas vezes, difíceis de garantir, especialmente em problemas de Geotecnia. Curiosamente, o estabelecimento de condições de semelhança em Mecânica dos Solos foi objeto de um trabalho pioneiro de Manuel Rocha, em 1953. Neste trabalho, aplicado ao estudo de barragens, foram definidas diversas escalas de semelhança, entre o modelo e o protótipo, tais como a escala de coeficientes de dilatação térmica, de módulos de elasticidade, de dimensões, entre outras, por forma a reproduzir da maneira mais exata possível a estrutura a edificar (Magalhães, 2014).

O modelo físico que suporta o estudo da presente dissertação começou a ser desenvolvido no trabalho integrado na dissertação de Mestrado em Engenharia Civil de Magalhães (2014), bem como no Projeto Integrado de Licenciatura em Engenharia Civil de Ana Fonseca e Rui Santos (2016), do ISEP.

O modelo físico foi construído com o recurso a pneus de reduzida dimensão (260mm de diâmetro e 85mm de altura), ligados com corda com 6mm de diâmetro. O aterro no tardo do paramento de pneus foi materializado com solo residual do granito, caracterizado em trabalhos anteriores (Magalhães, 2014 e Melo, 2014).

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DA GEOMETRIA E FASEAMENTO CONSTRUTIVO

O modelo físico inicial era constituído por um conjunto de 14 fiadas de pneus de reduzido diâmetro, perfazendo uma altura total de 1m, uma largura de 2,12m e com uma profundidade igual a 2m.

A face direita do modelo coincide com uma parede, tendo sido interposta uma chapa metálica entre esta e os pneus e o solo de aterro, de modo a diminuir o atrito entre estes materiais. A face direita é materializada por uma estrutura metálica que envolve uma chapa de acrílico, também esta reduzindo o atrito nesta fronteira do modelo e permitindo a visualização da configuração do solo quando o aterro do tardoz se aproximar da rotura.

No tardoz do modelo o solo de aterro contacta diretamente com uma parede.

A construção do modelo inicial envolveu o seguinte faseamento construtivo, que se reproduz de forma esquemática, nas Figuras 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6.

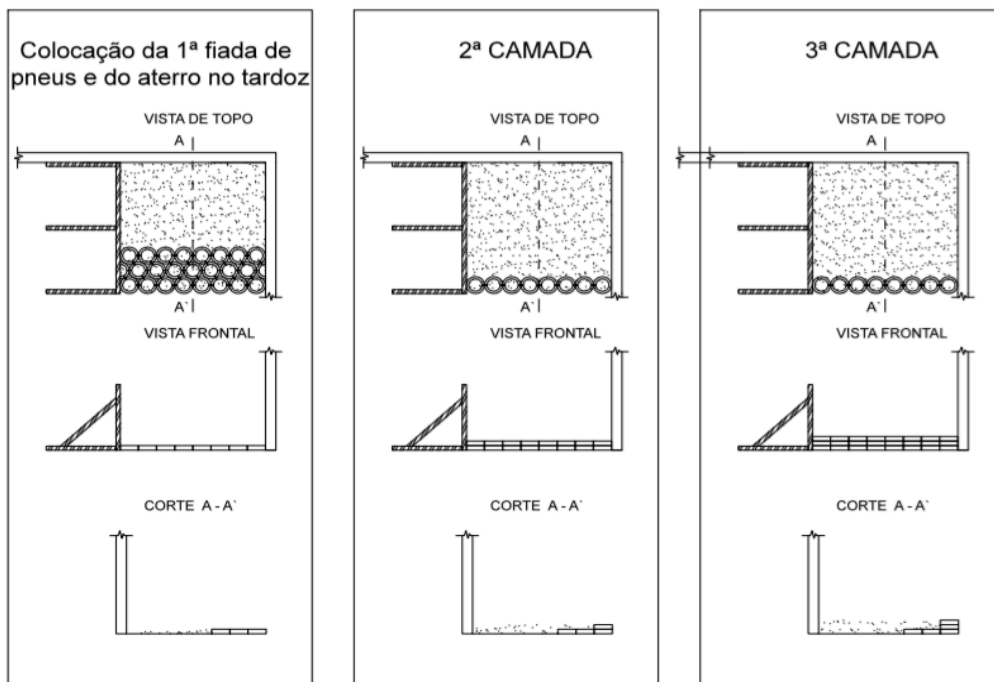


Figura 3.1 – Faseamento construtivo da 1ª à 3ª camada.

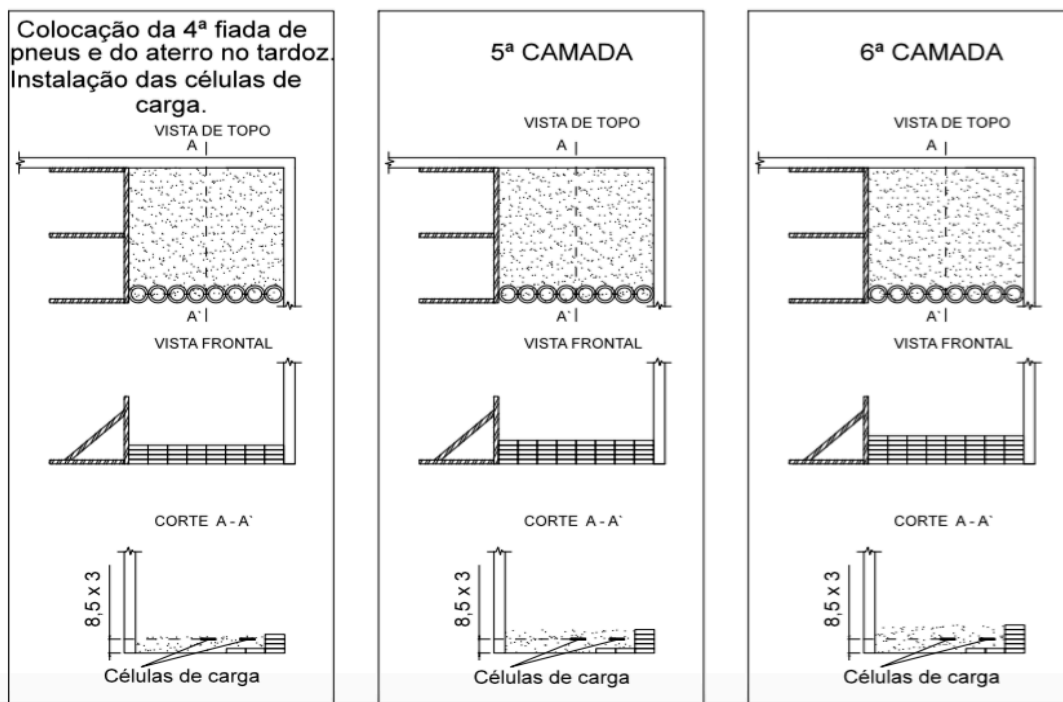


Figura 3.2 – Faseamento construtivo da 4ª à 6ª camada.

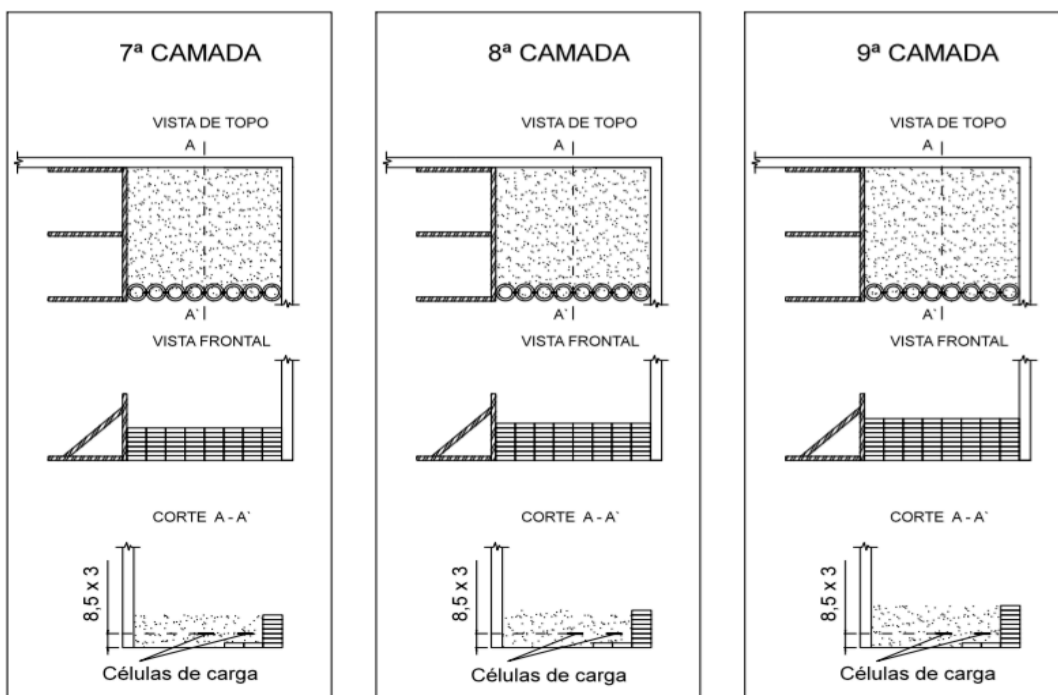


Figura 3.3 – Faseamento construtivo da 7ª à 9ª camada.

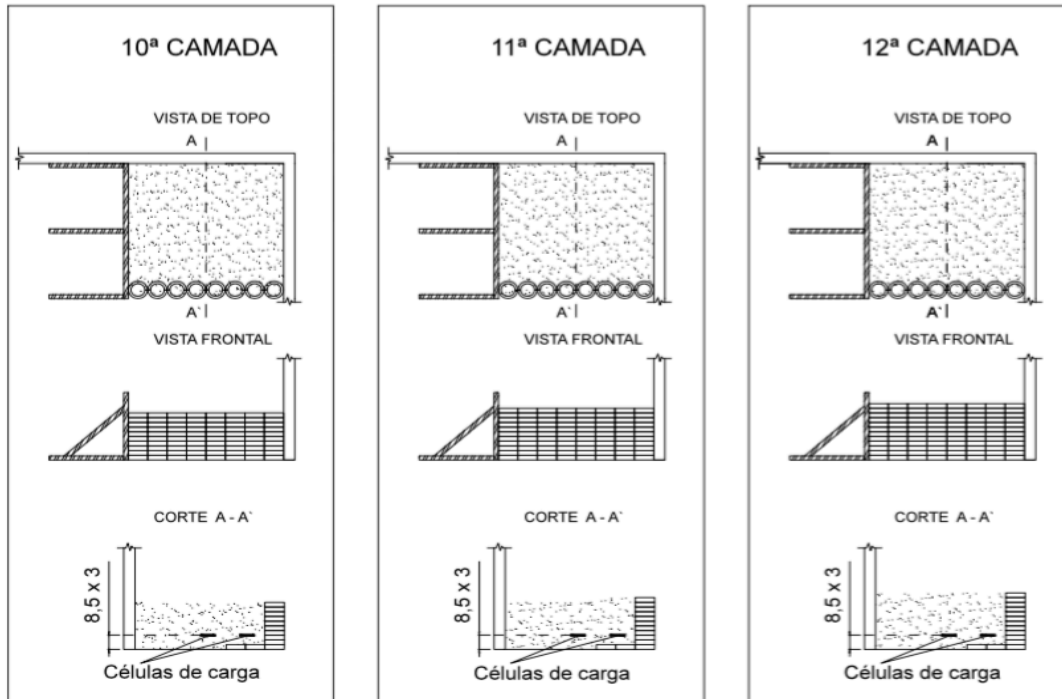


Figura 3.4 – Faseamento construtivo da 10ª à 12ª camada.

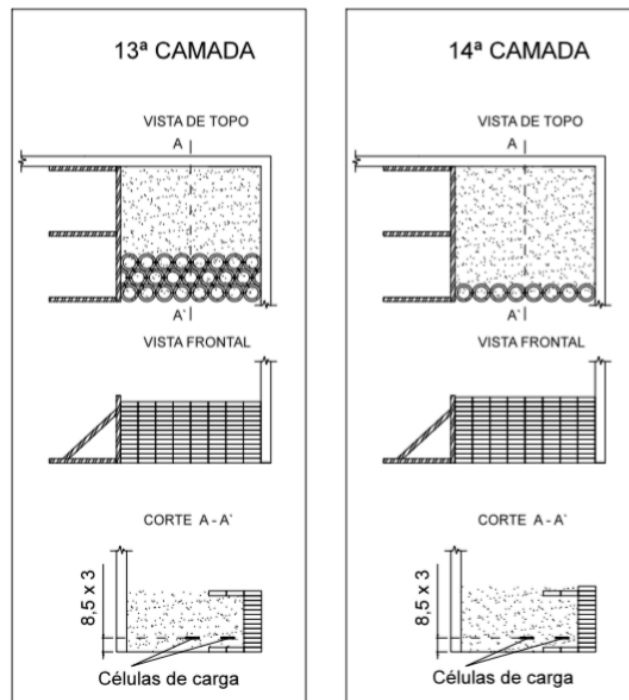


Figura 3.5 – Faseamento construtivo da 13ª à 14ª camada.

O modelo inicial foi carregado com o recurso a dois depósitos que foram progressivamente cheios de água. Os depósitos, com a capacidade de 1000l cada, foram apoiados numa tábua de aglomerado de madeira com 3cm de espessura, procurando garantir uma maior uniformidade de aplicação de tensões à superfície do aterro suportado (Figura 3.6 e 3.7).

O modelo foi instrumentado com recurso a duas células de pressão de corda vibrante, instaladas ao nível da 4ª fiada de pneus e com posição em planta representada na Figura 3.8.

Para a monitorização dos deslocamentos do paramento da estrutura instalaram-se dois alinhamentos de transdutores de deslocamentos, cuja posição se representa também na Figura 3.8, um com transdutores em 3 níveis e outro em dois níveis.

Este modelo inicial foi carregado em Julho de 2016, tendo a respetiva carga permanecida sobre o aterro até Maio de 2017. Durante este período de 8 meses foram recolhidas as leituras em todos os instrumentos instalados.

A longa duração de aplicação da sobrecarga teve como objetivo avaliar o efeito da fluência do material de aterro nos valores das pressões mobilizadas na base do aterro e dos deslocamentos experimentados pelo paramento.

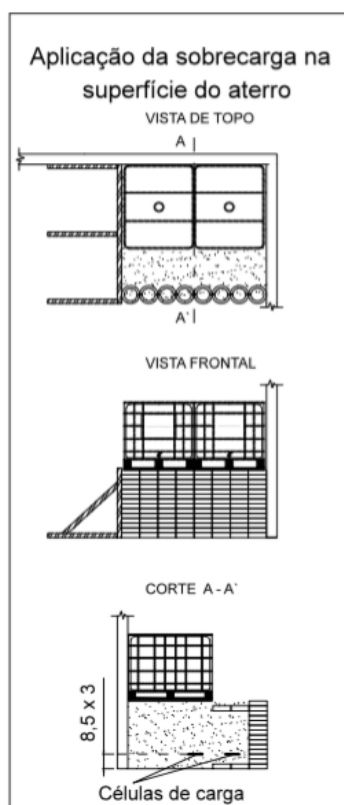


Figura 3.6 – Faseamento construtivo com aplicação da sobrecarga.



Figura 3.7 – Modelo inicial.

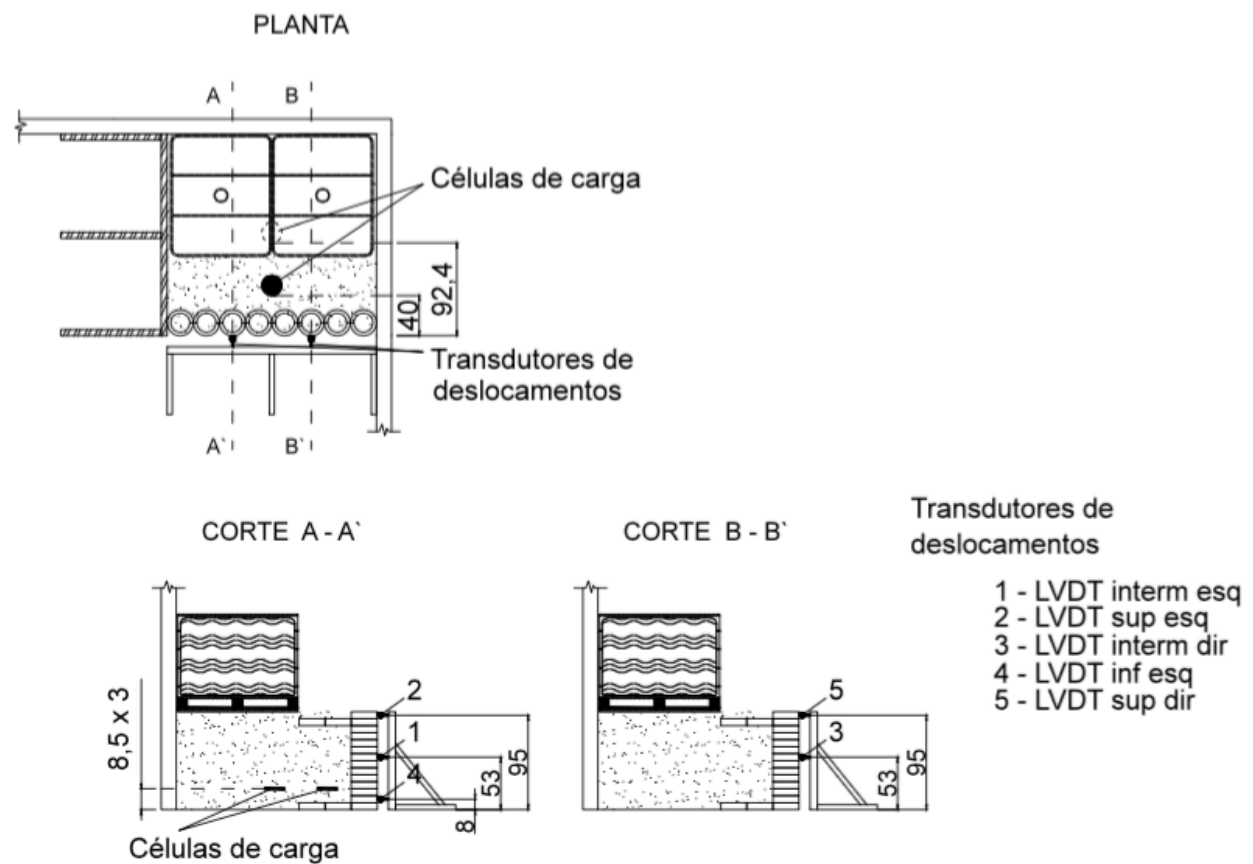


Figura 3.8 – Esquema em planta e em corte da instrumentação instalada no modelo inicial.

Após a recolha dos resultados deste carregamento em Julho de 2016, procedeu-se à respetiva descarga, em 8 Maio de 2017, acompanhado da monitorização com as células de carga e com os transdutores de deslocamento.

Considerou-se, em seguida, uma alteração à geometria do modelo. Retirou-se a fiada do reforço superior (Figura 3.9 e 3.10), posicionaram-se os depósitos adjacentes ao paramento (Figura 3.11) e procedeu-se ao respetivo enchimento em 10 Maio de 2017. Na Figura 3.12 representam-se, esquematicamente, as fases que sucederam a definição e o carregamento do modelo inicial:

- Descarga do modelo;
- Escavação e retirada do reforço superior;
- Aterro da camada escavada e compactação;
- Reposicionamento dos depósitos adjacentes ao paramento;
- Recarregamento do modelo.

A monitorização durante o carregamento do modelo com esta nova geometria decorreu com o recurso às células de carga e a dois alinhamentos de transdutores de deslocamentos cuja posição se esquematiza nas Figuras 3.11 a 3.15.



Figura 3.9 – Escavação do solo junto ao paramento.



Figura 3.10 – Retirada do reforço superior.



Figura 3.11 – Modelo sem reforço superior e com os depósitos junto ao paramento.

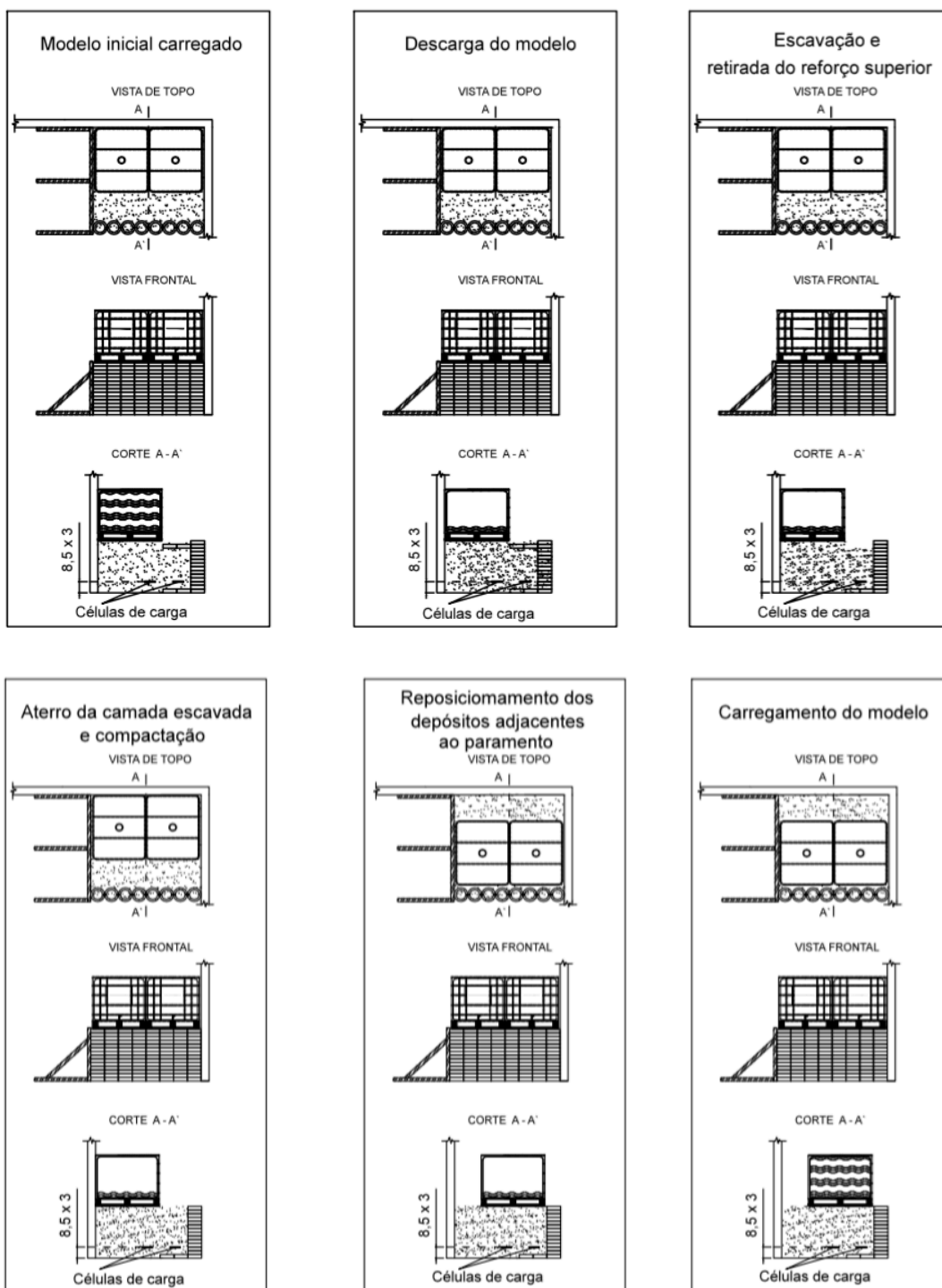


Figura 3.12 – Descarga, alteração da geometria do modelo e novo carregamento.

Os cinco transdutores de deslocamentos foram fixos por suportes magnéticos a uma estrutura metálica, em dois alinhamentos e em três alturas distintas (o alinhamento da esquerda a três alturas - 4.5 cm, 52 cm e 98.5 cm, de baixo para cima e o da direita a duas alturas – 52 cm e 98.5 cm, de baixo para cima), de modo a analisar a evolução dos deslocamentos do muro (ilustrado na Figura 3.13).



Figura 3.13 - Instalação de cinco transdutores de deslocamentos.

Uma nova geometria de carregamento foi definida, em seguida.

Em 23 Maio de 2017 foi descarregado o modelo, com controlo e medição das variações de pressão e de deslocamentos com a instrumentação instalada.

Aplicou-se, em seguida, uma força horizontal, junto à base dos depósitos (Figura 3.16), em conjunto com a tensão vertical associada à altura da água nos depósitos que se encheram novamente, procurando induzir um estado de tensão que impusesse maiores níveis de deformação.

Na Figura 3.14 apresenta-se, esquematicamente, o faseamento construtivo associado a esta nova geometria do carregamento.

A aplicação da força horizontal envolveu a instalação de um perfil UNP junto à base dos depósitos e de uma chapa encostada à parede.

Entre o atuador e esta chapa foi colocado uma célula de carga da marca HBM, com capacidade de 25kN, do modelo U10M/25kN e da série 012475S, pra controlo da força aplicada, conforme se pode verificar no ponto 3.3.3.

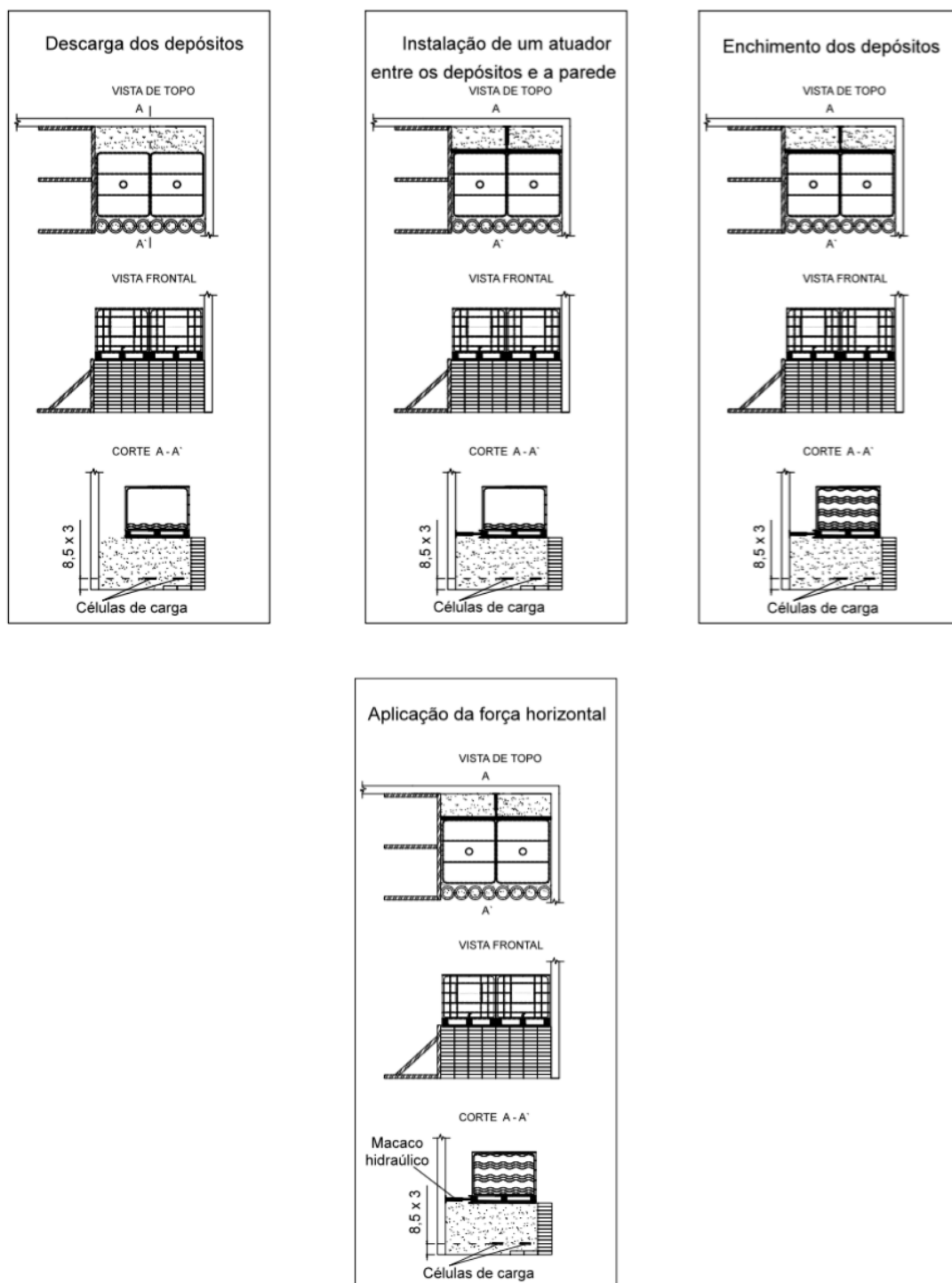


Figura 3.14 – Descarga e nova alteração da geometria do carregamento.

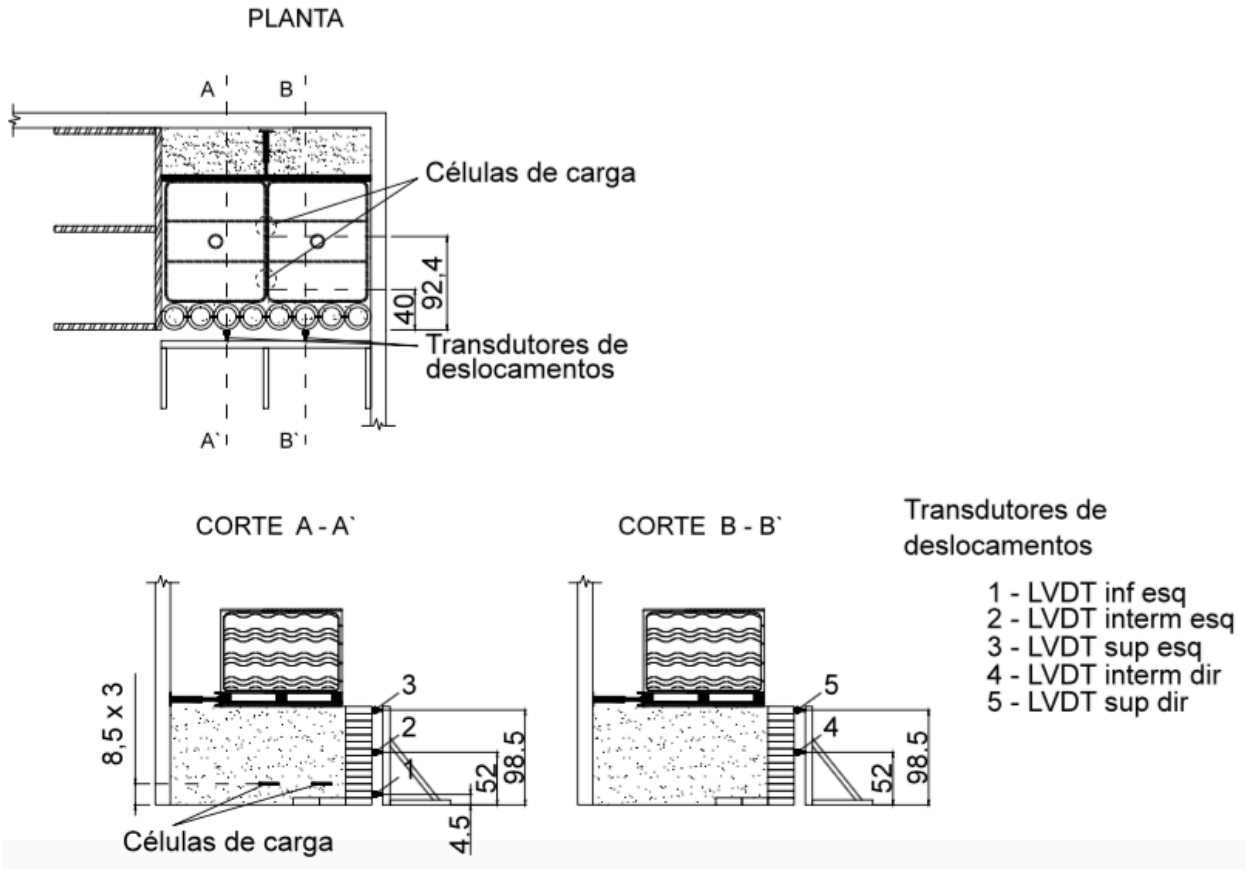


Figura 3.15 – Esquema em planta e em corte com a posição da instrumentação.



Figura 3.16 – Modelo e esquema de aplicação da força horizontal.

Na Figura 3.17 apresenta-se, de forma esquemática, uma linha do tempo com a evolução da geometria do modelo e do respetivo carregamento.



Figura 3.17 - Linha de tempo da evolução do modelo e do respetivo carregamento.



### 3.3 INSTRUMENTAÇÃO DO MODELO FÍSICO

Embora tenha sido já feita referência à instrumentação instalada no modelo físico, detalhar-se-á, em seguida, este aspeto do trabalho realizado.

Para a instrumentação do modelo físico instalaram-se células de pressão, transdutores de deslocamentos e uma célula de carga acoplada a um macaco hidráulica usado para aplicação de uma força horizontal.

#### 3.3.1 Células de pressão de corda vibrante

As células de pressão de corda vibrante permitem medir as tensões transmitidas pelo terreno.

Estas células são compostas por duas placas circulares de aço inoxidável cujas periferias são soldadas, de forma a criar uma cavidade selada. A cavidade é cheia com óleo não compressível.

As células de pressão são instaladas de maneira a que a pressão aplicada à superfície seja transmitida ao óleo, dentro da célula, e medida com um transdutor de corda vibrante com margem de erro  $\pm 0,5\%$  (especificações em Anexo I). As células de pressão são normalmente englobadas no terreno ou fixas à estrutura.



Figura 3.18 - Célula de pressão de corda vibrante.

No modelo físico as células foram incorporadas entre a terceira e a quarta camadas de aterro e posicionadas em planta, de modo a que uma se encontre sob a influência das camadas de reforço e a

### CAPÍTULO 3

outra esteja já afastada dessa influência. As células são ligadas com um cabo blindado a uma unidade terminal, unidade de leitura portátil ou “datataker”.

Qualquer pressão externa sobre a célula comprime as chapas de aço e cria uma mudança na pressão do óleo dentro da célula. A mudança de pressão é convertida, pelo transdutor, num sinal elétrico e pode ser lido remotamente utilizando uma unidade de leitura ou “datataker”.

Datataker DT515 serie 3 com 4 canais digitais (entrada ou saída), 3 canais de contador digital de alta velocidade, armazena os dados na memória interna (166.500 leituras) ou cartões de memória PCMCIA removíveis (1.390.000 leituras) (Especificações em Anexo II).

Nas Figuras 3.19 à 3.22 apresentam-se vários aspetos associados à instalação das células de carga, desde a peneiração do solo envolvente, de modo a evitar a presença de partículas de maior dimensão que possam introduzir concentrações de pressões nas células e pôr em causa a fiabilidade das respetivas leituras, até ao seu posicionamento e à compactação do solo envolvente (Fonseca A., Santos R., 2016).



Figura 3.19 – Peneiração do solo envolvente das células (Fonseca A., Santos R., 2016).

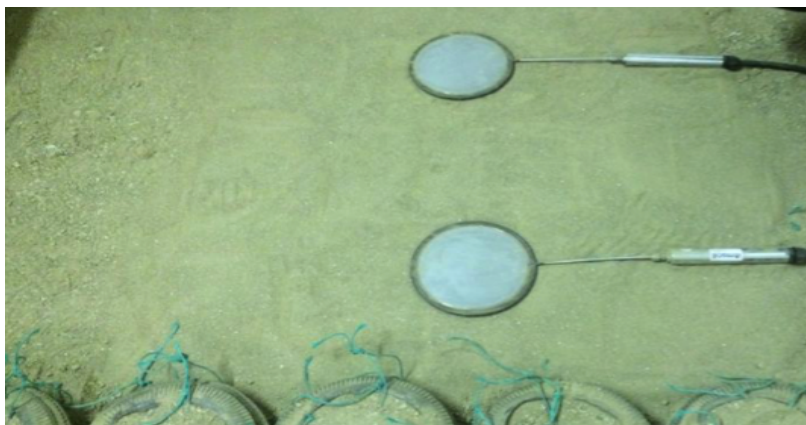


Figura 3.20 – Posicionamento das células (Fonseca A., Santos R., 2016).

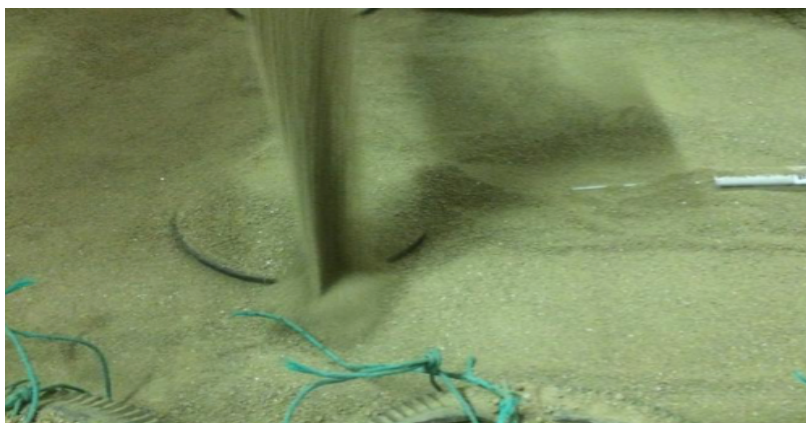


Figura 3.21 – Colocação da camada fina de solo sobre as células (Fonseca A., Santos R., 2016).

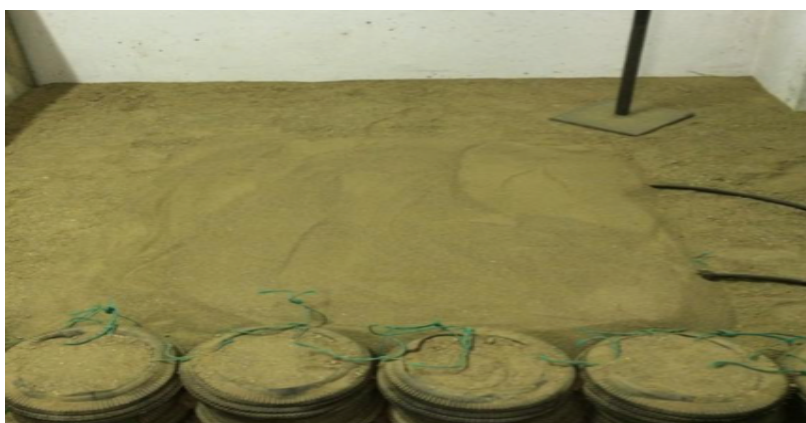


Figura 3.22 – Compactação do solo peneirado (Fonseca A., Santos R., 2016).

### 3.3.2 Transdutores de deslocamento

O transdutor é qualquer dispositivo capaz de transformar um tipo de sinal noutra para permitir o controlo de processos físicos ou realizar uma medição.

O transdutor diferencial variável linear é conhecido como LVDT e é um transdutor de deslocamento (Figura 3.23). Os transdutores de deslocamentos utilizados na instrumentação do modelo são da referência RDP-LCD1000 e RDP-LCD2000C. As principais características técnicas destes modelos encontram-se incluídos na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2.



Figura 3.23 – LVDT

Tabela 3.1 – Características gerais do LVDT 1000.

Sensor	RDC – LCD1000
<b>Campo de medição</b>	$\pm 25$ mm
<b>Erro (% F.S.)</b>	$< \pm 0,5 / \pm 0,25 / \pm 0,1$
<b>L</b>	203 mm
<b>X</b>	69 mm
<b>Peso total</b>	270 g

Tabela 3.2 - Características gerais do LVDT 2000C.

Sensor	RDC – LCD2000C
<b>Campo de medição</b>	±50 mm
<b>Erro (% F.S.)</b>	< ±0,5/±0,25/±0,1
<b>L</b>	336 mm
<b>X</b>	76 mm
<b>Peso total</b>	511 g

No Anexo III apresentam-se a ficha técnica destes LVDTs.

Os transdutores de deslocamentos foram colocados em dois alinhamentos e em três alturas distintas, fixados por suportes magnéticos a uma estrutura metálica, envolvendo o da esquerda três alturas (4.5 cm, 52 cm e 98.5 cm, de baixo para cima) e o da direita duas alturas (52cm e 98.5cm, de baixo para cima), de modo a acompanhar o comportamento do paramento da estrutura de suporte de terras, em termos de deslocamentos. Na Figura 3.24 apresenta-se um esquema, reproduzido em planta e em corte na Figura 3.25, com a localização da instrumentação.

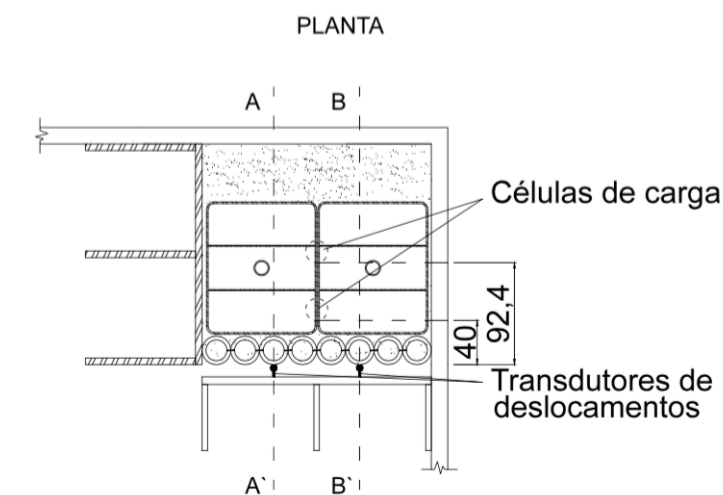


Figura 3.24– Localização da instrumentação - esquema em planta.

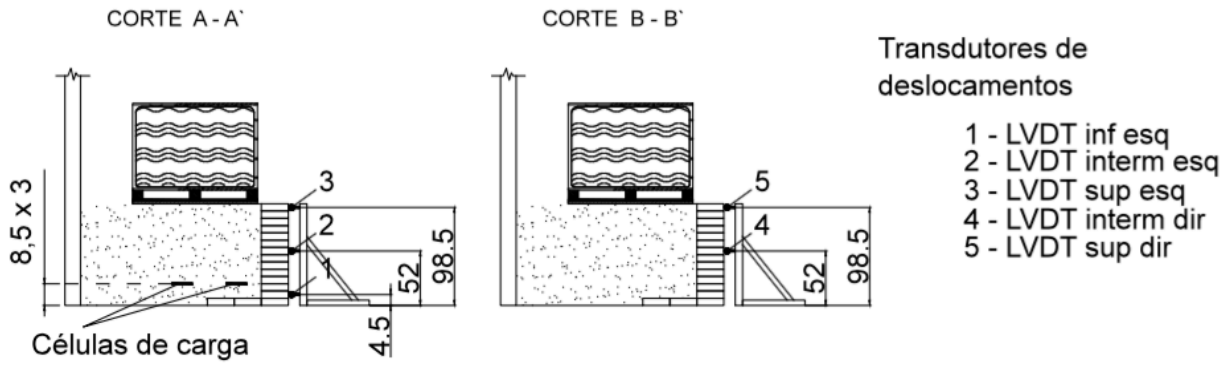


Figura 3.25– Localização da instrumentação - esquema em corte.

### 3.3.3 Célula de carga

Um macaco hidráulico consiste num pistão de grande diâmetro acionado pelo fluxo de líquido proveniente de um pistão de pequeno diâmetro. Uma pequena força sobre o pistão pequeno irá gerar uma grande força no grande, sendo os respetivos cursos inversamente proporcionais.

Para a aplicação da força horizontal foi usado o macaco hidráulico representado na Figura 3.26. Este macaco atuará sobre um perfil metálico UNP, instalado na base dos depósitos, e apoiar-se-á na extremidade aposta, numa chapa colocada na parede do edifício.



Figura 3.26- Macaco hidráulico.

Para controlo da força aplicada interpôs-se uma célula de carga entre esta chapa e o pistão do macaco, de acordo com o esquema representado na Figura 3.27

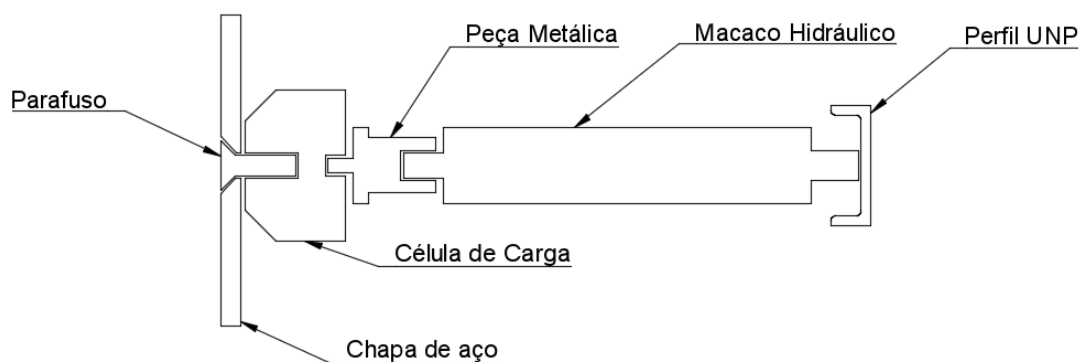


Figura 3.27 – Esquema em corte do posicionamento da célula, chapa e o pistão do macaco.

Na Figura 3.28 representa-se o esquema, em corte, do posicionamento do macaco hidráulico.

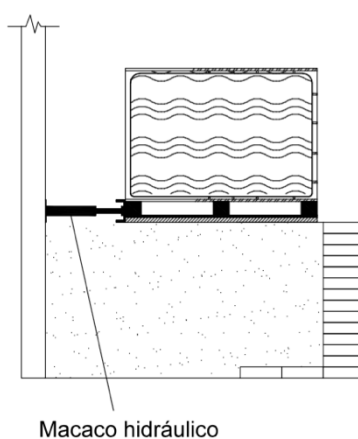


Figura 3.28 – Esquema em corte do posicionamento do macaco hidráulico.

Na Figura 3.29 e 3.30 pode visualizar-se, em detalhe, o esquema adotado para aplicação da força horizontal.



Figura 3.29 – Conjunto macaco hidráulico, perfil UNP e célula de carga.

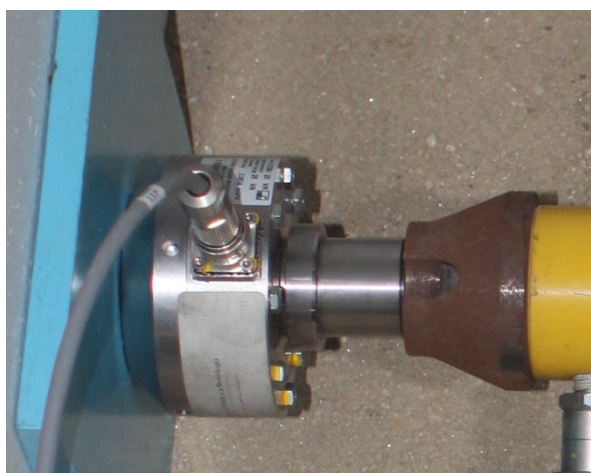
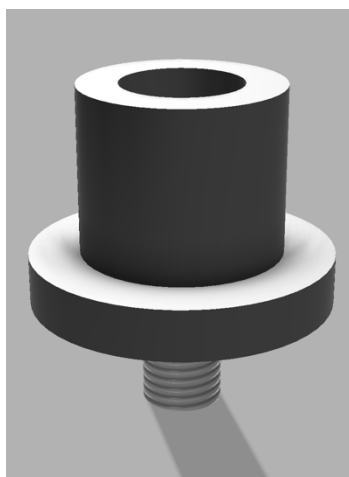


Figura 3.30 – Pormenor de ligação.

A peça metálica que permite a transição do macaco hidráulico para a célula de carga foi desenhada, inicialmente, com um programa automático de desenho, foi em seguida impresso um protótipo numa impressora 3D e depois produzida em aço no Laboratório de Mecânica Aplicada do ISEP.

Na Figura 3.31 representam-se as três fases do processo que envolveu a produção desta peça.



a) Desenho em perspectiva



b) Impressão tridimensional



c) Peça em aço

Figura 3.31 – Transição entre macaco hidráulico e célula de carga, fases do processo de produção da peça metálica.



## CAPÍTULO 4

### MODELO NUMÉRICO

#### 4.1 PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO $RS^2$

Para comparar os resultados obtidos com a instrumentação do modelo físico com os correspondentes à respetiva modelação numérica foi utilizado o programa de cálculo automático  $RS^2$  da *RocScience*.

A existência destes dois conjuntos de valores permitirá garantir a calibração do modelo numérico, de modo a que o estudo possa ser estendido a outras geometrias e casos de carga e os respetivos resultados e conclusões sejam obtidos com a desejada fiabilidade.

O programa  $RS^2$  é um *software* desenvolvido na Universidade de Toronto, Canadá, e tem como objetivo a análise bidimensional elasto-plástica com formulação pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) de problemas geotécnicos.

Modelos complexos com várias etapas construtivas podem facilmente ser criados, tais como, túneis em rocha, cavernas subterrâneas, minas a céu aberto, encostas, aterros e muitos outros (Magalhães,2014).

#### 4.2 MODELO NUMÉRICO COM GEOMETRIA ATUAL

No início do presente estágio o modelo físico à escala reduzida encontrava-se carregado com um esquema de carga que se visualiza na Figura 4.1.

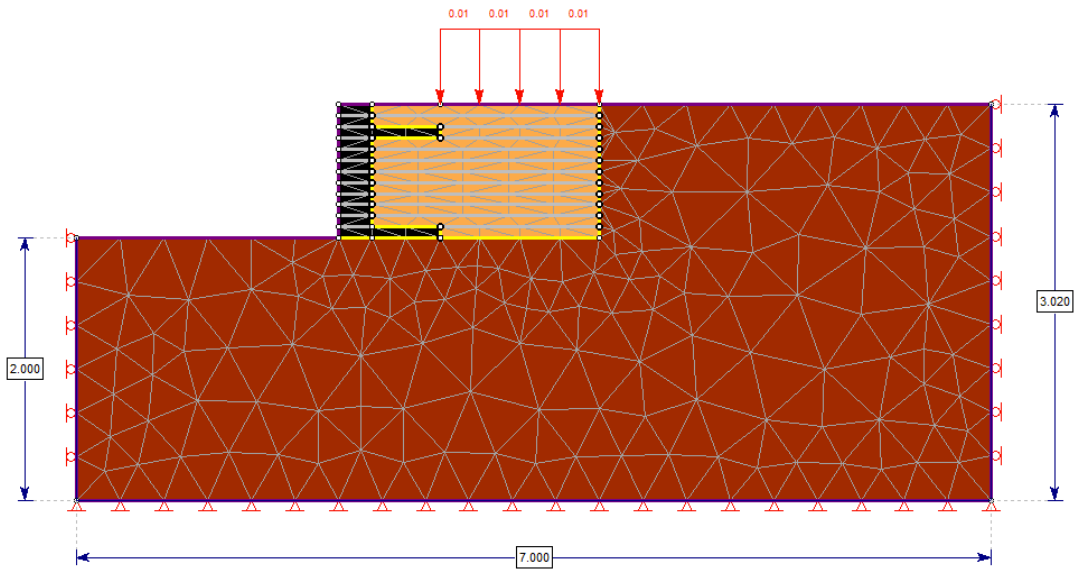


Figura 4.1 – Modelo físico à escala reduzida (Magalhães,2004).

Com o objetivo de avaliar os resultados da reprodução da situação atual do modelo físico, recorrendo à análise numérica com o programa RS<sup>2</sup>, realizou-se um conjunto de cálculos em que se variaram alguns aspetos do modelo.

Na Figura 4.2 apresentam-se os resultados da última fase, em termos de deslocamentos, considerando as características e a malha definida em trabalho anterior (Magalhães,2004).

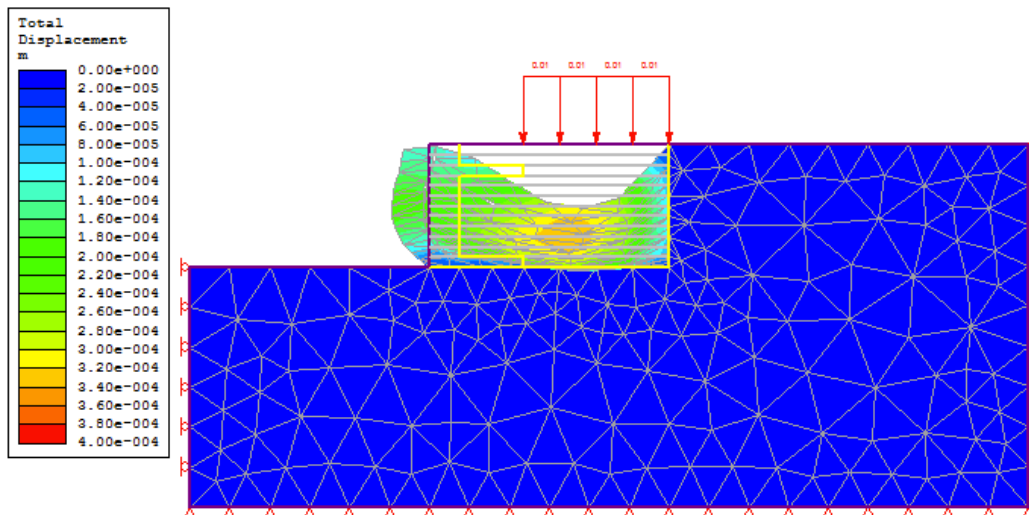


Figura 4.2 – Resultados dos deslocamentos totais na última fase (Magalhães,2004).

Recorde-se que a malha de elementos finitos considerada foi a ilustrada na Figura 4.1, com elementos finitos de 3 nós, triangulares, representando o solo de aterro e o Pneusol, e com elementos de junta, representando as interfaces entre o Pneusol e o solo de aterro, bem como entre estes e o solo de fundação e a parede.

Embora o pavimento e a parede no tardoz do modelo sejam rígidos, quando comparados com os materiais constituintes do modelo, entendeu-se estender a malha de elementos finitos para a direita e para a base do modelo o que permitirá, em fase seguinte do estudo, avaliar a influência da deformabilidade do material de fundação no comportamento do modelo.

As características atribuídas aos diferentes materiais estão resumidas na Figura 4.3. As características atribuídas aos elementos de junta indicam-se na Figura 4.4.

Material Name	Color	Initial Element Loading	Unit Weight (MN/m <sup>3</sup> )	Elastic Type	Young's Modulus (MPa)	Shear Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Angle to E1 (deg)	E1-E2 (MPa)	E2 (MPa)	V12	V=V12	Failure Criterion	Material Type	Tensile Strength (MPa)	Dilation Angle (deg)	Friction Angle (peak) (deg)	Friction Angle (residual) (deg)	Cohesion (peak) (MPa)	Cohesion (residual) (MPa)	Piezo Line	Ru
Pneusol	Black	Field Stress and Body Force	0.017	Transversely Isotropic		50		0	150	225	0.3	0.15	Mohr Coulomb		0		30		0.001		None	0
Solo de aterro	Orange	Field Stress and Body Force	0.021	Isotropic	20		0.4						Mohr Coulomb	Plastic	0	0	30	30	0.001	0.001	None	0
Solo de fundação	Red	Field Stress and Body Force	0.021	Isotropic	2e+008		0.4						Mohr Coulomb	Elastic	0		35		10.5		None	0

Figura 4.3 - Características dos materiais (Magalhães,2004).

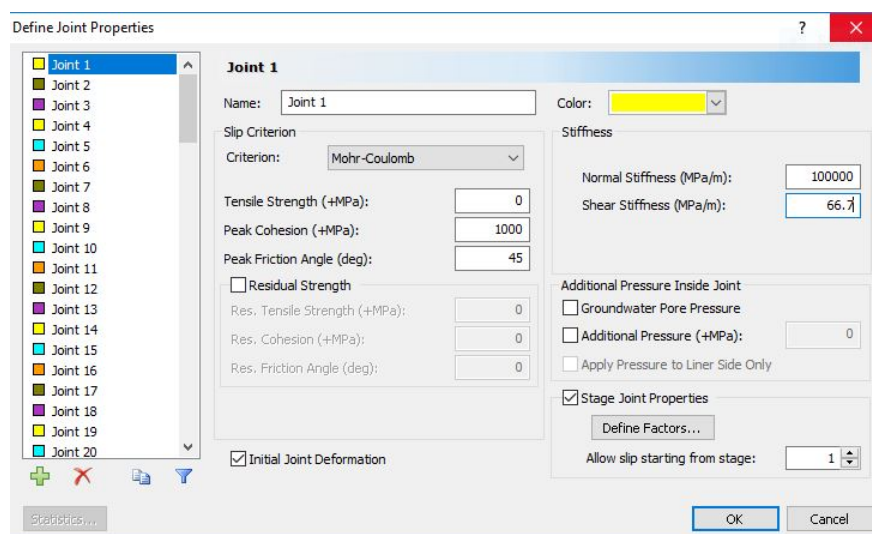


Figura 4.4 - Características do elemento de junta (joint1) (Magalhães,2004).

A observação da configuração da deformada com uma convexidade demasiadamente acentuada impôs a criação de um outro elemento de junta (joint2), cujas características se indicam na Figura 4.5 e que se representam na malha ilustrada na Figura 4.6. Este tipo de junta deve ser usado quando o elemento de junta intercepta uma superfície livre ou outro elemento de junta.

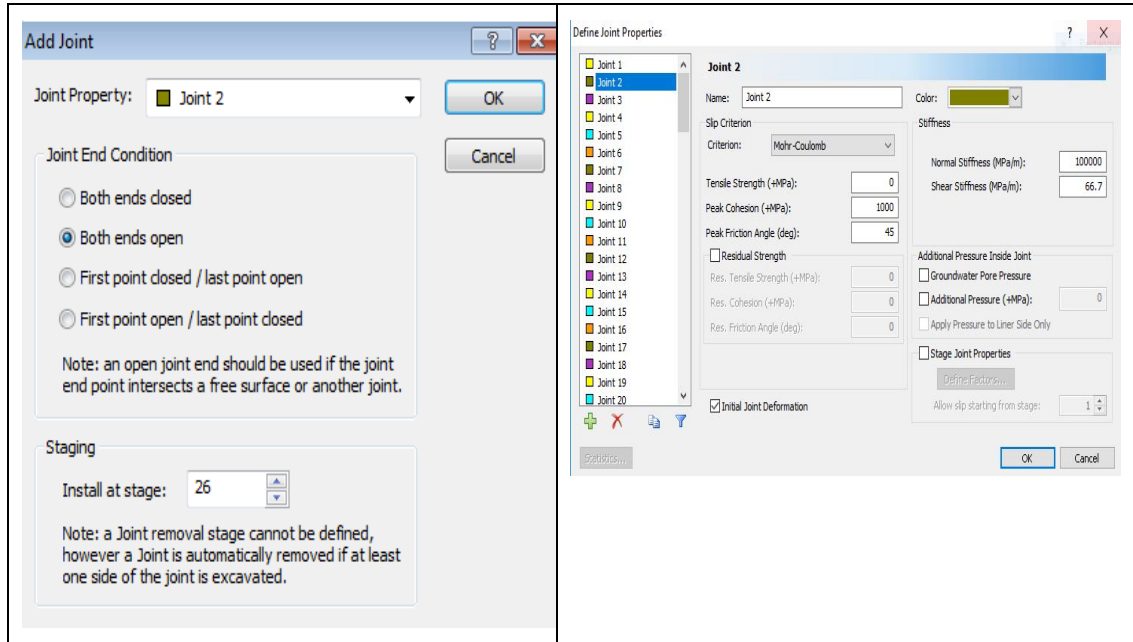


Figura 4.5 - Características do novo elemento de junta.

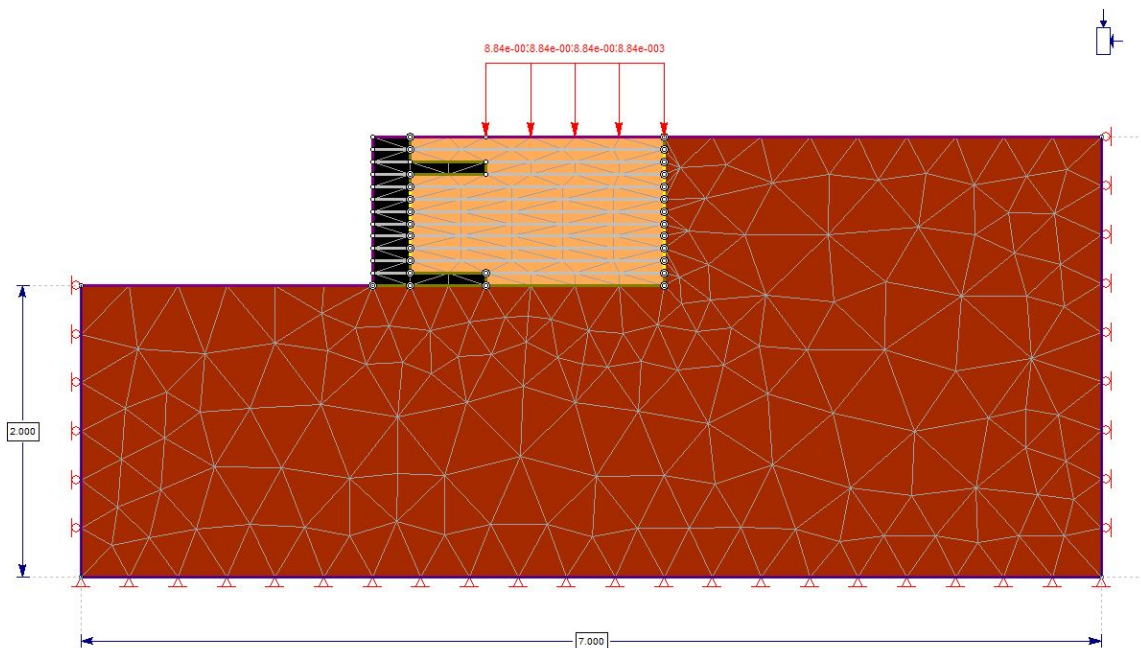


Figura 4.6 – Malha com o novo elemento de junta (joint1 e joint2).

Deverá ainda considerar-se o valor da sobrecarga obtida da seguinte forma.

Para o cálculo da sobrecarga consideraram-se as seguintes massas:

- Peso próprio dos depósitos (64,1x2 kg);
- Peso próprio da peça de madeira colocada na base dos depósitos (35 kg);
- Água (2000 kg).

A área da peça de madeira igual a 2 x 1,2 m<sup>2</sup>.

Resultou, assim, um valor da sobrecarga igual a:

$$\frac{(64,1 \times 2 + 35 + 2000) \times 9,81}{2 \times 1,2} = 8842,1 \text{ N/m}^2 = 8,842 \text{ KN/m}^2 \quad (4.1)$$

Os resultados obtidos, em termos de deslocamentos, com a introdução desta alteração apresentam-se na Figura 4.7, verificando-se que a deformada do paramento exibe agora uma configuração que, embora convexa, se atenuou relativamente à anterior.

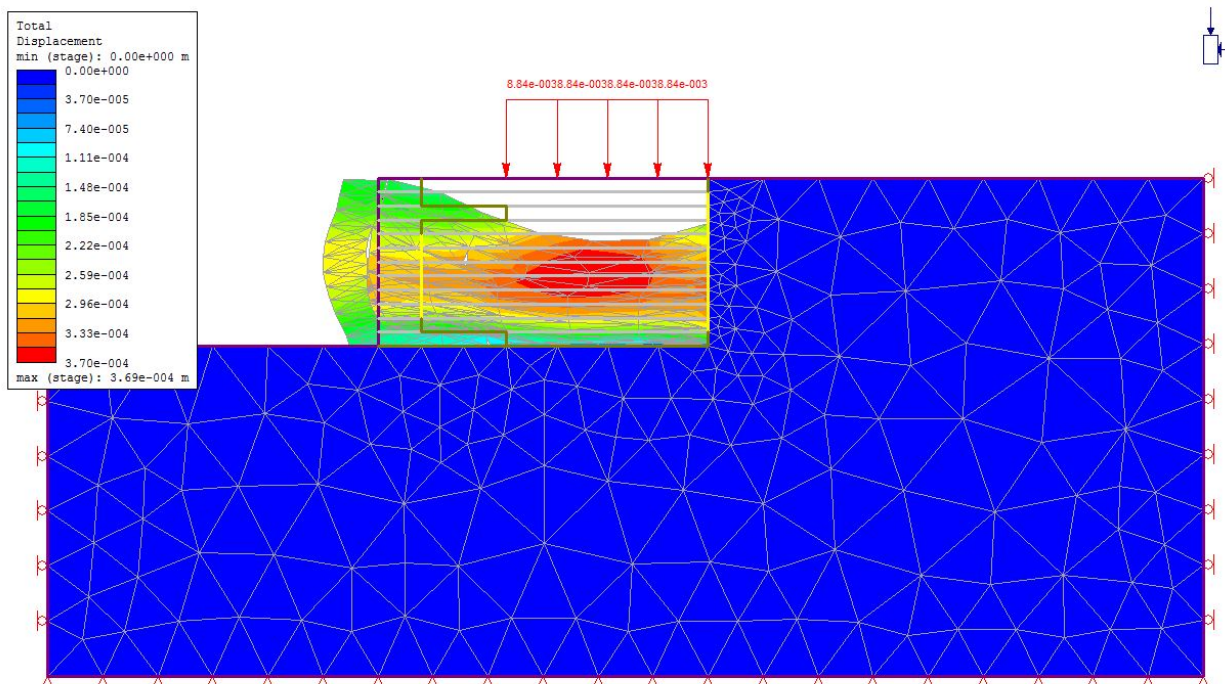


Figura 4.7 – Deslocamentos totais com introdução do elemento junta (joint2).

Considerou-se, em seguida, uma alteração no modelo de comportamento do Pneuol. As características atribuídas no trabalho de Magalhães (2014) a este material, apresentadas na Tabela 6.1, foram retiradas da bibliografia da especialidade, nomeadamente dos trabalhos de O’Shaughnessy (1997) e Siera (2009). Consideraram-se, alternativamente, as reproduzidas na Figura 4.8, também retiradas da bibliografia da especialidade, nomeadamente do trabalho de Magalhães (2014), em que se alteraram o modelo de comportamento do Pneuol e as respetivas características de resistência e de deformabilidade.

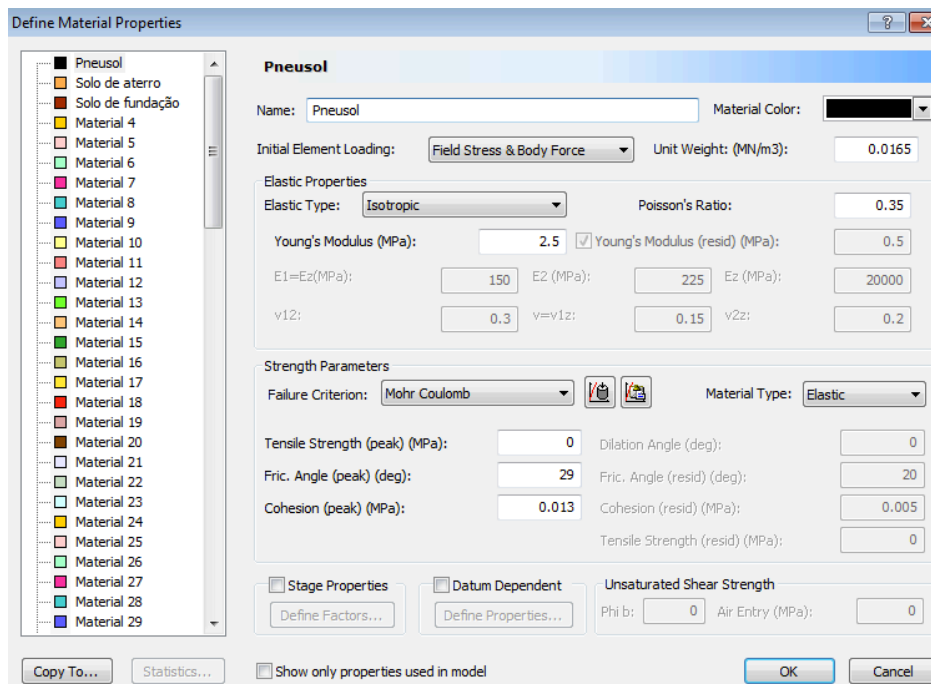


Figura 4.8 - Características atribuídas ao comportamento do pneuol.

Os resultados obtidos, em termos de deslocamentos, com a introdução desta alteração apresentam-se na Figura 4.9 em que se identifica uma atenuação da convexidade da deformada do paramento com um valor máximo do deslocamento igual a 3,22mm.

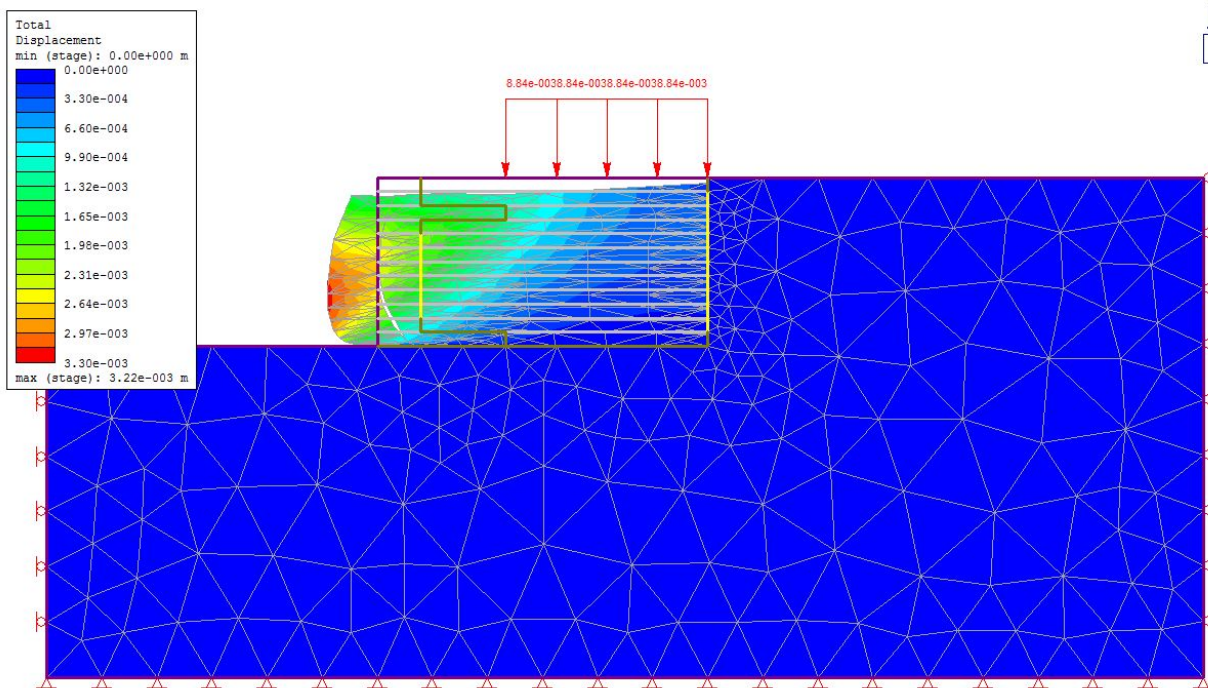


Figura 4.9 – Resultados dos deslocamentos totais com alteração do comportamento do Pneusol.

Considerou-se, em seguida, a instalação de elementos de junta Joint 2 em todas as interfaces, como ilustra a Figura 4.10.

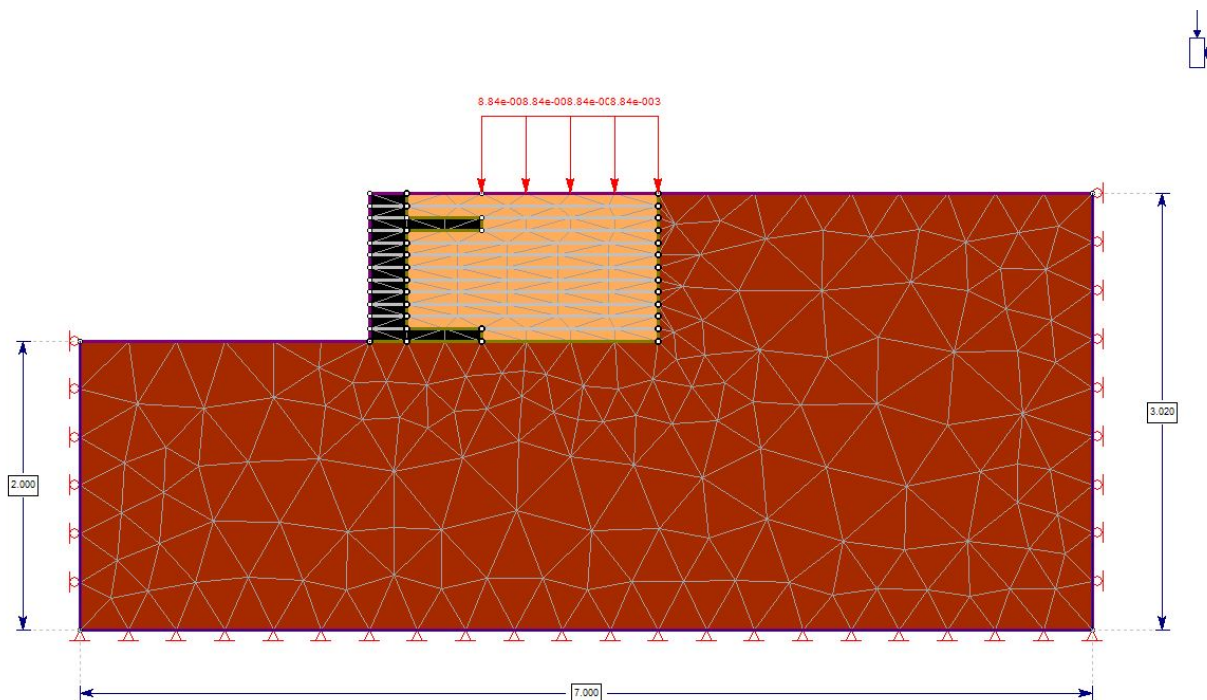


Figura 4.10 - Malha com o elemento de junta Joint 2 em toda a estrutura.

Com esta alteração apresentam-se na Figura 4.11 os resultados obtidos, em termos de deslocamentos, verificando-se, tal como na situação anterior, uma atenuação da convexidade da deformada e um valor máximo do deslocamento igual a 2,68mm.

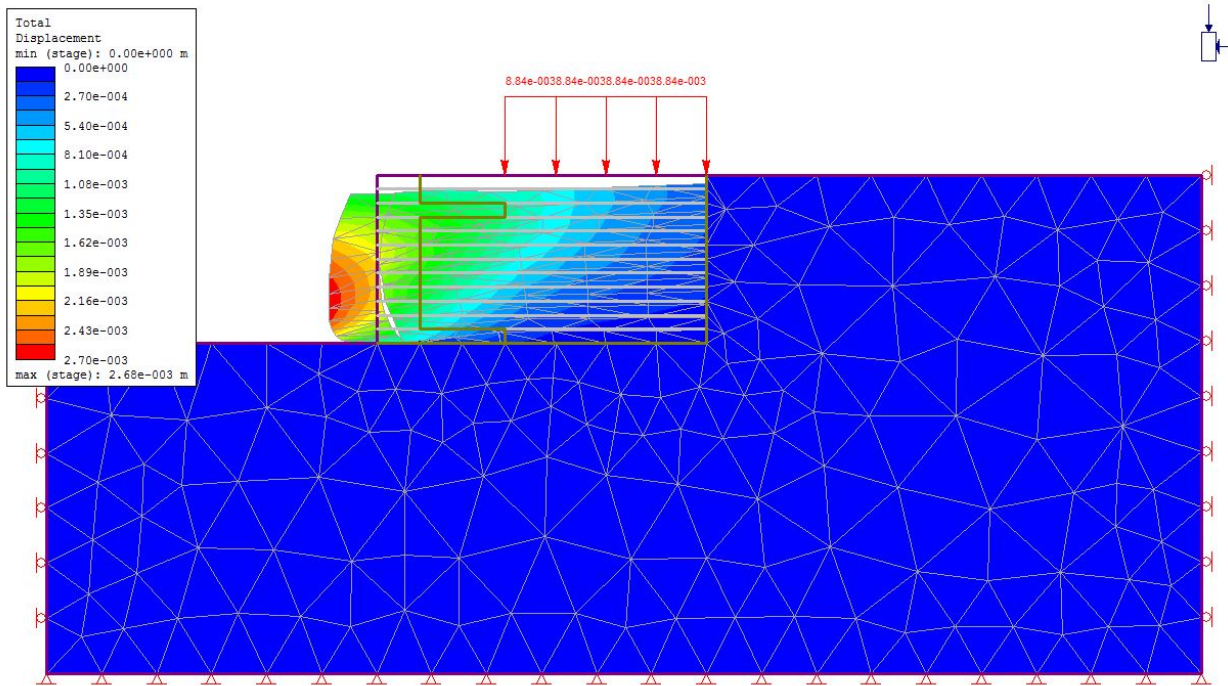


Figura 4.11 – Resultados dos deslocamentos totais com o joint2 em toda a estrutura.

### 4.3 MODELO NUMÉRICO COM GEOMETRIA MODIFICADA

Tal como se referiu já no capítulo relativo ao modelo físico considerou-se, em seguida, uma alteração à geometria do modelo, retirando-se o reforço superior e posicionando os depósitos adjacentes ao paramento.

Na Figura 4.12 mostra-se a configuração da malha de elementos finitos e as condições fronteira do modelo.



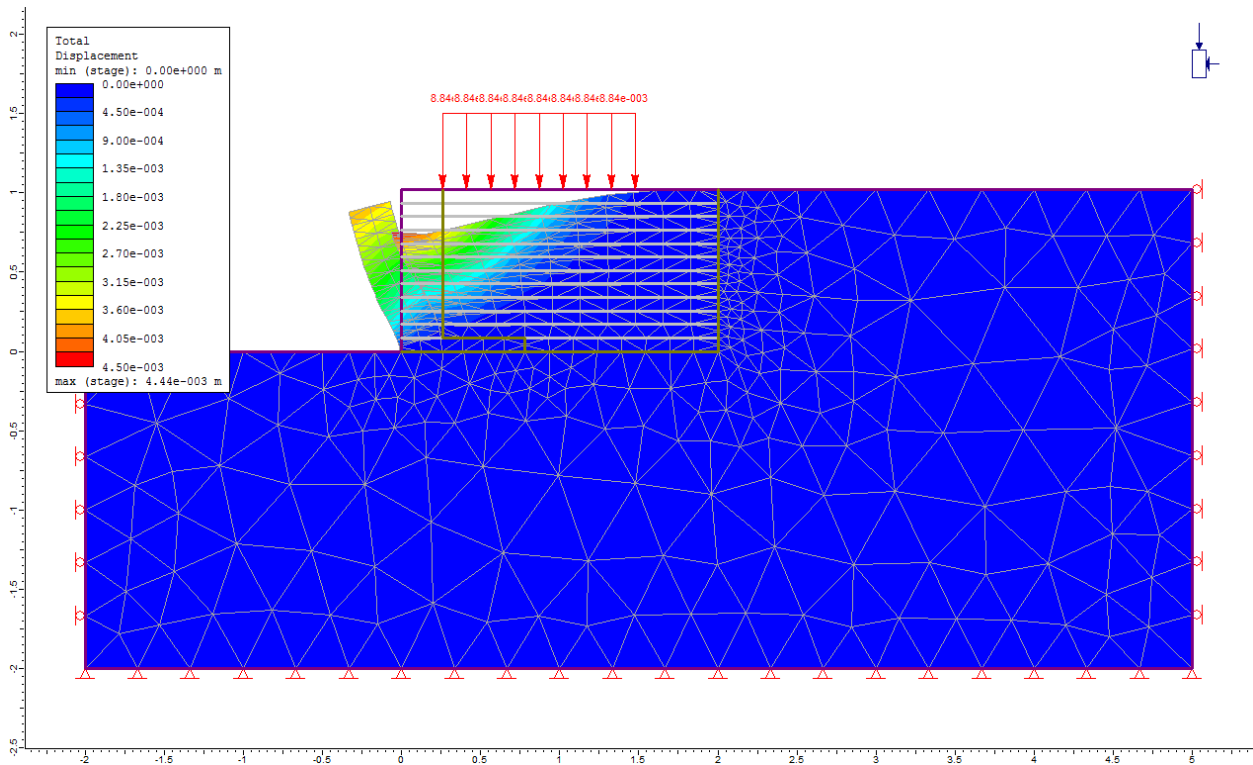


Figura 4.13 – Resultados dos deslocamentos na ultima fase (comportamento transversal isotrópico) do modelo sem reforço superior e com nova posição dos depósitos.

Numa fase seguinte foi modelado o carregamento da superfície do terrapleno com a sobrecarga correspondente à água dos depósitos e a atuação de uma força horizontal.

Consideraram-se dois valores para essa força na horizontal. Esses valores foram distribuídos pela área da peça de madeira e resultaram na aplicação de uma carga uniformemente distribuída horizontal na superfície do terrapleno.

Os valores considerados da força foram 4000N e 9500N, este último correspondendo ao máximo aplicado.

A estas forças corresponderam valores de tensões aplicadas de 1,667 KPa e 3,958 KPa, respetivamente.

Nas Figuras 4.14 e 4.15 representam-se os deslocamentos experimentados pelo paramento e pelo aterro suportado para as duas situações de carregamento.

Os deslocamentos máximos experimentados pelo paramento foram iguais a 9,92mm e a 21mm, respetivamente, para os valores das forças de 4000N e 9500N.





## CAPÍTULO 5

### **APRESENTAÇÃO, INTERPRETAÇÃO E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS**

O modelo inicial foi carregado em Julho de 2016, tendo sido prolongada a respetiva monitorização até Março de 2017.

Uma perturbação na instrumentação, identificada no mês de Fevereiro de 2017, impõe a consideração dos resultados apenas entre Julho de 2016 e Janeiro de 2017.

Na Figura 5.1 apresentam-se os deslocamentos obtidos para os diferentes meses e verifica-se que os deslocamentos do paramento apresentam uma convexidade, crescendo com o tempo, o que pode indicar o efeito de fluência do material de aterro.

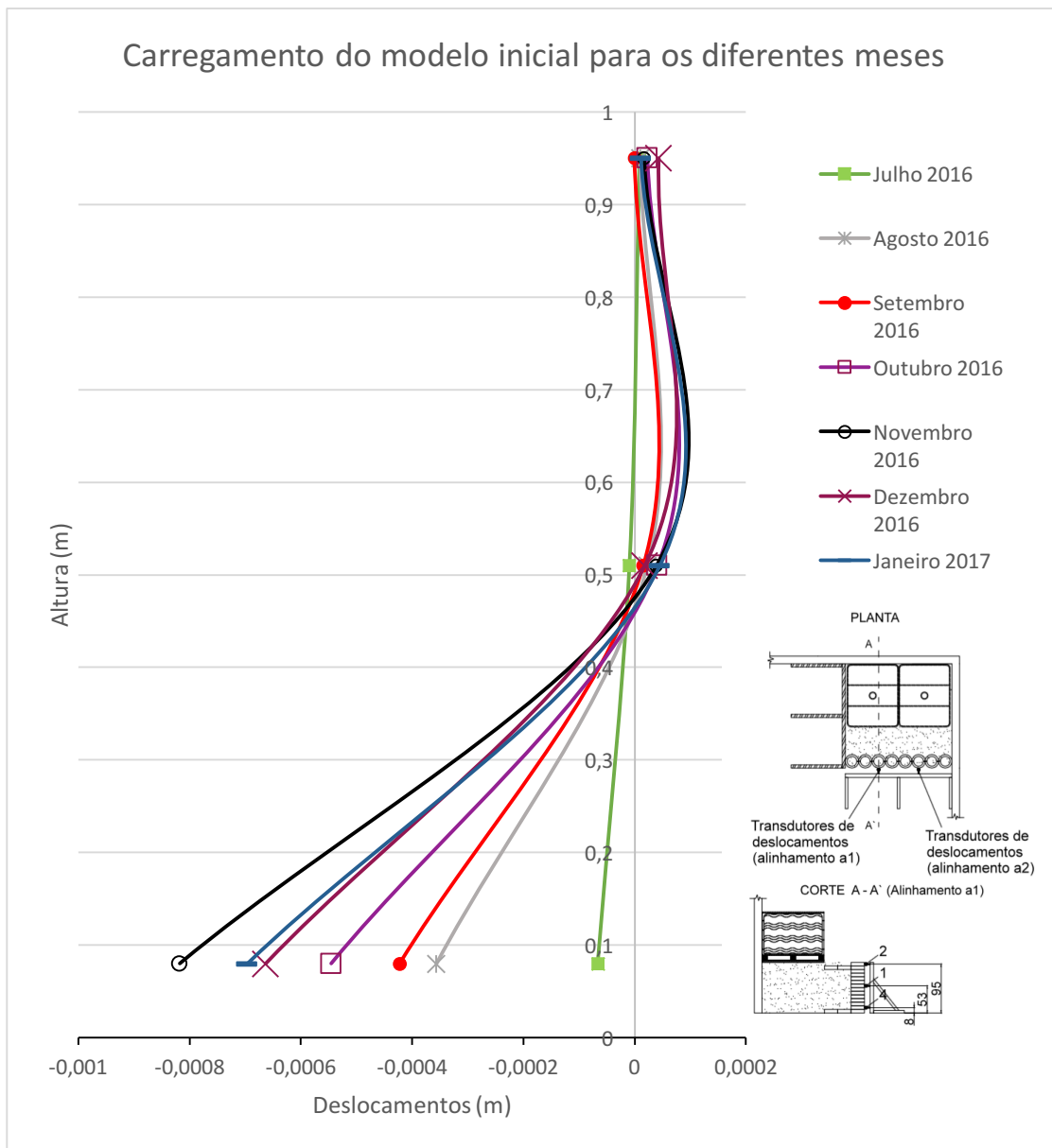


Figura 5.1 – Deslocamento do paramento inicial na fase de carregamento (alinhamento a1 dos transdutores de deslocamentos).

Na Figura 5.2 comparam-se os resultados numéricos obtidos com os valores obtidos com a instrumentação para os meses de Julho de 2016 e Janeiro 2017.

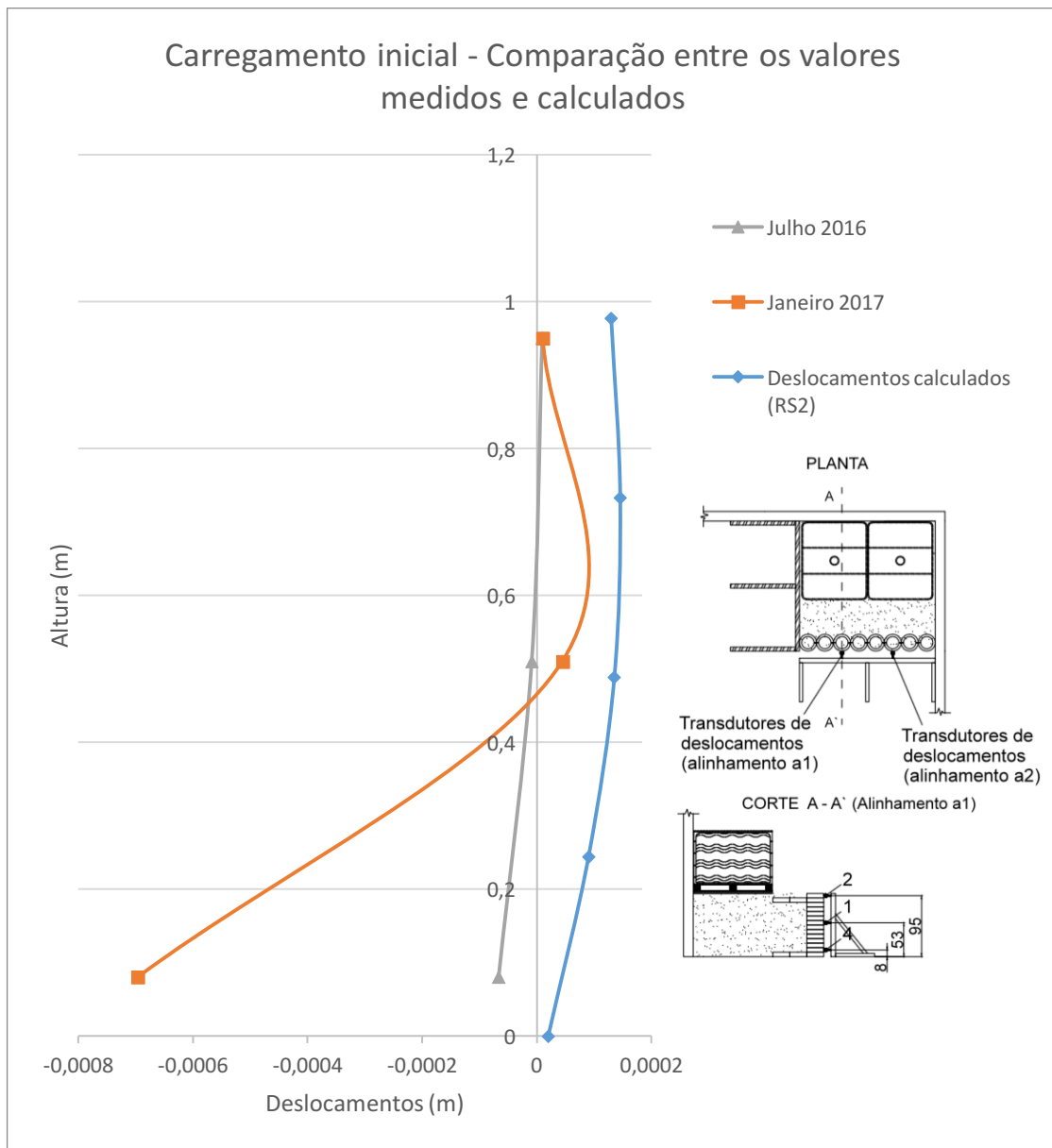


Figura 5.2 – Deslocamentos do paramento inicial na fase de carregamento comparação entre os valores medidos e calculados

Na Figura 5.3 apresentam-se os deslocamentos registados antes da descarga e após esta ter ocorrido, verificando-se a sua quase completa recuperação.

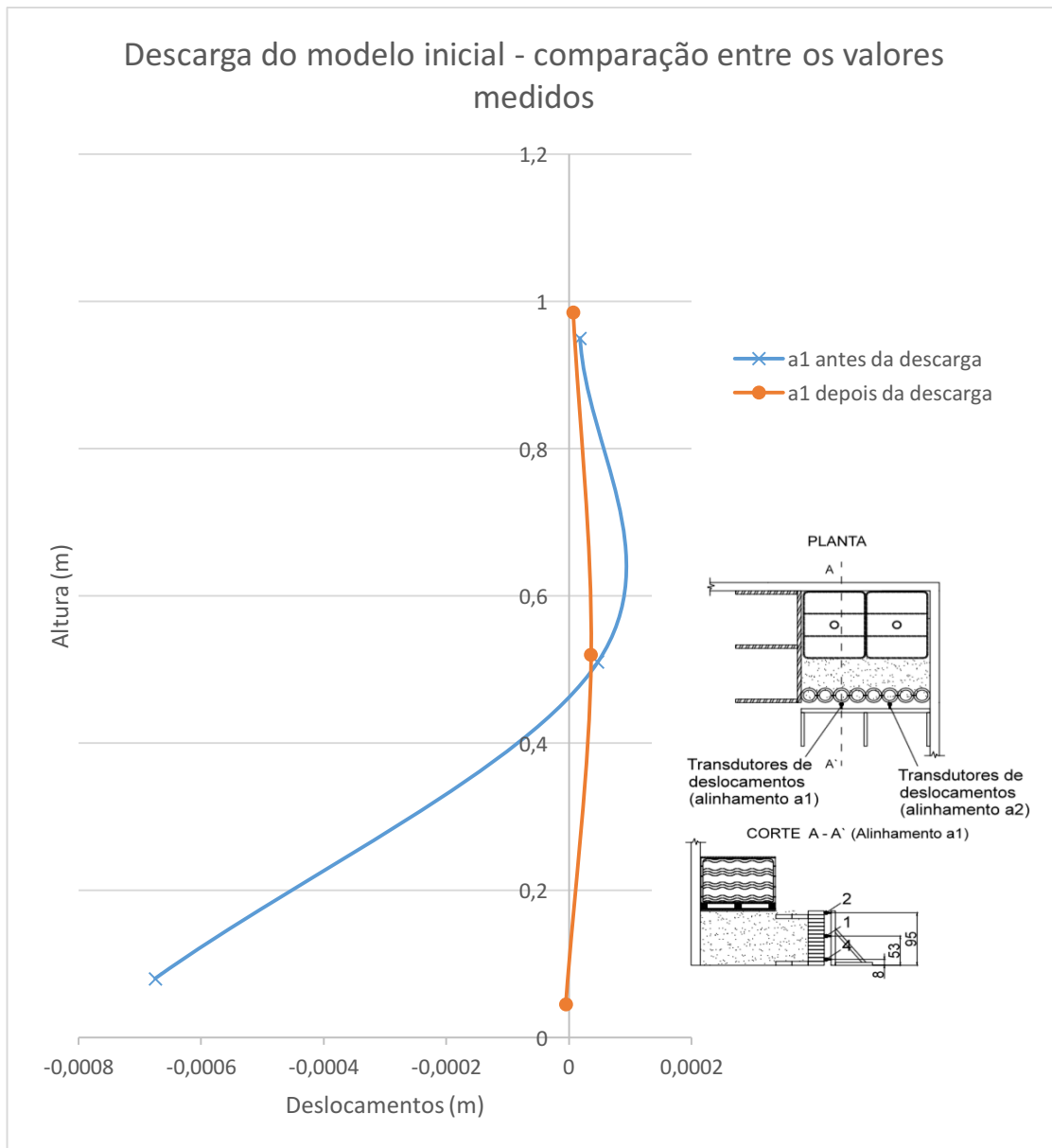


Figura 5.3 – Deslocamentos do paramento do modelo inicial na fase de descarga (alinhamento a1).

Na Figura 5.4 apresenta-se a comparação entre os valores numéricos obtidos antes da descarga e após esta ter ocorrido com os valores obtidos medidos, verificando-se a sua quase completa recuperação.

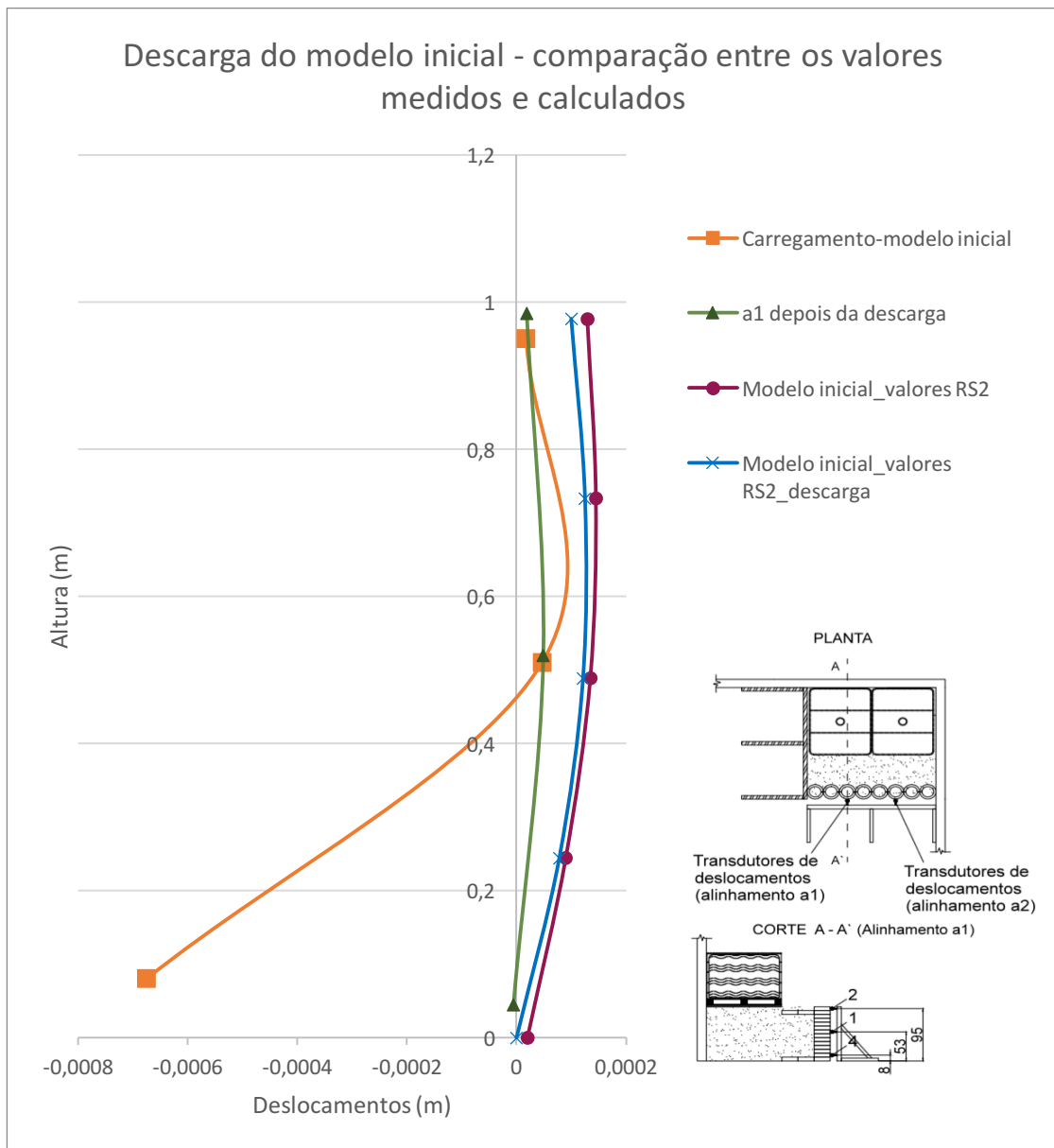


Figura 5.4 - Deslocamentos do paramento do modelo inicial da descarga. Comparação entre valores medidos e calculados.

O modelo foi alterado com a supressão do reforço superior e com a instalação dos depósitos juntos ao paramento.

Na Figura 5.5 ilustram-se os deslocamentos para três níveis de carga.

A configuração da deformada mantém-se semelhante à evidenciada no carregamento do modelo inicial, embora na última fase os deslocamentos do topo do paramento cresçam significativamente, em relação às fases anteriores e às evidenciadas no modelo inicial para idêntico nível de sobrecarga.

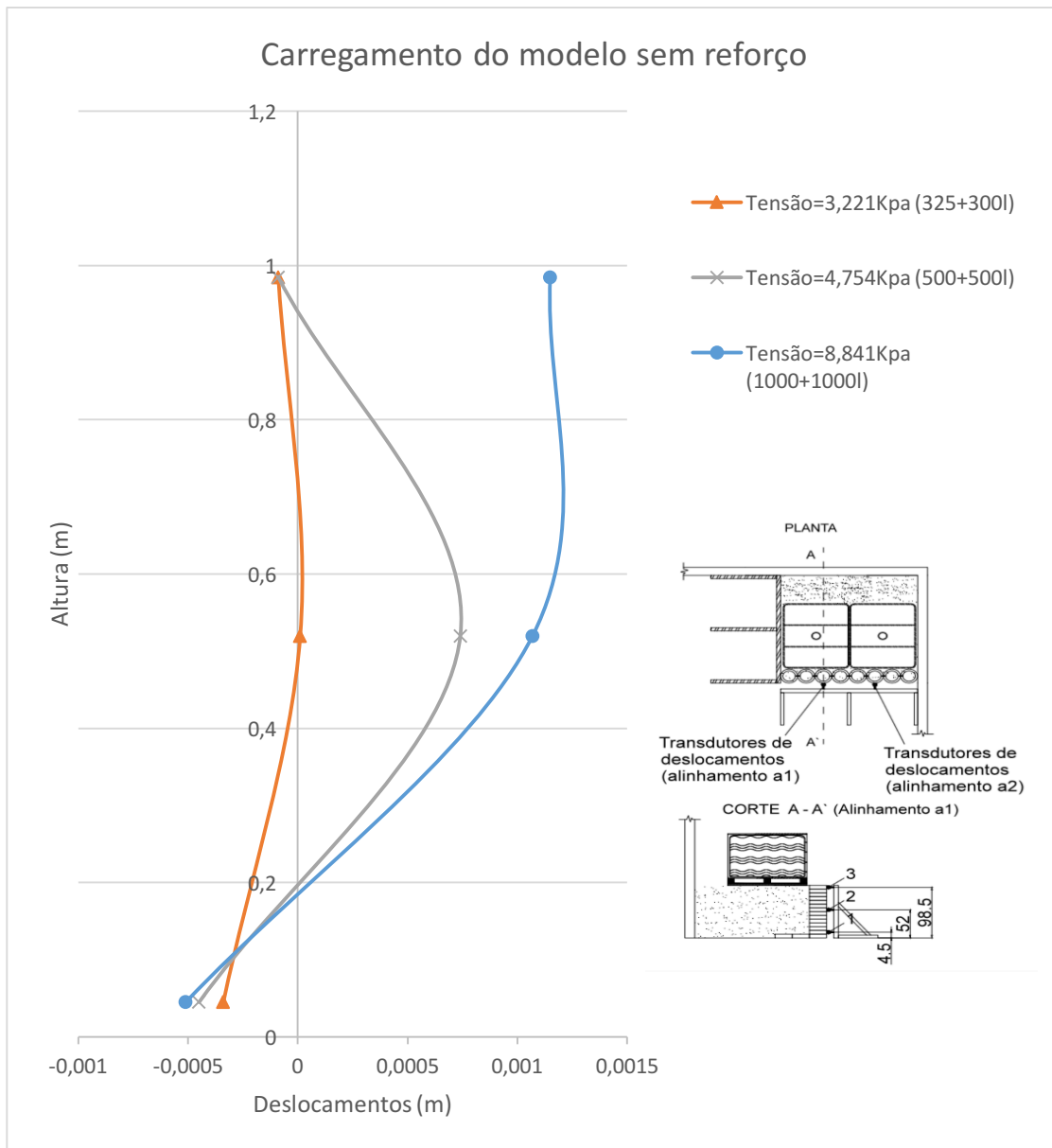


Figura 5.5 – Deslocamento do paramento do modelo sem reforço superior na fase de carregamento com sobrecarga vertical.

Com o programa de cálculo automático RS2 simulou-se o carregamento do modelo sem reforço superior, considerando duas alternativas, tal como se referiu já, para a modelação do comportamento do material “Pneusol” (isotrópico e transversal isotrópico).

Na Figura 5.6 comparam-se os resultados numéricos obtidos, em termos de deslocamentos do paramento, com os valores obtidos com a instrumentação.

Verifica-se uma semelhança significativa entre as deformadas correspondentes à análise numérica, para as duas alternativas de comportamentos do material “Pneusol”. A deformada resultante dos valores da

instrumentação apresenta uma configuração idêntica e bastante próxima das correspondentes à análise numérica.

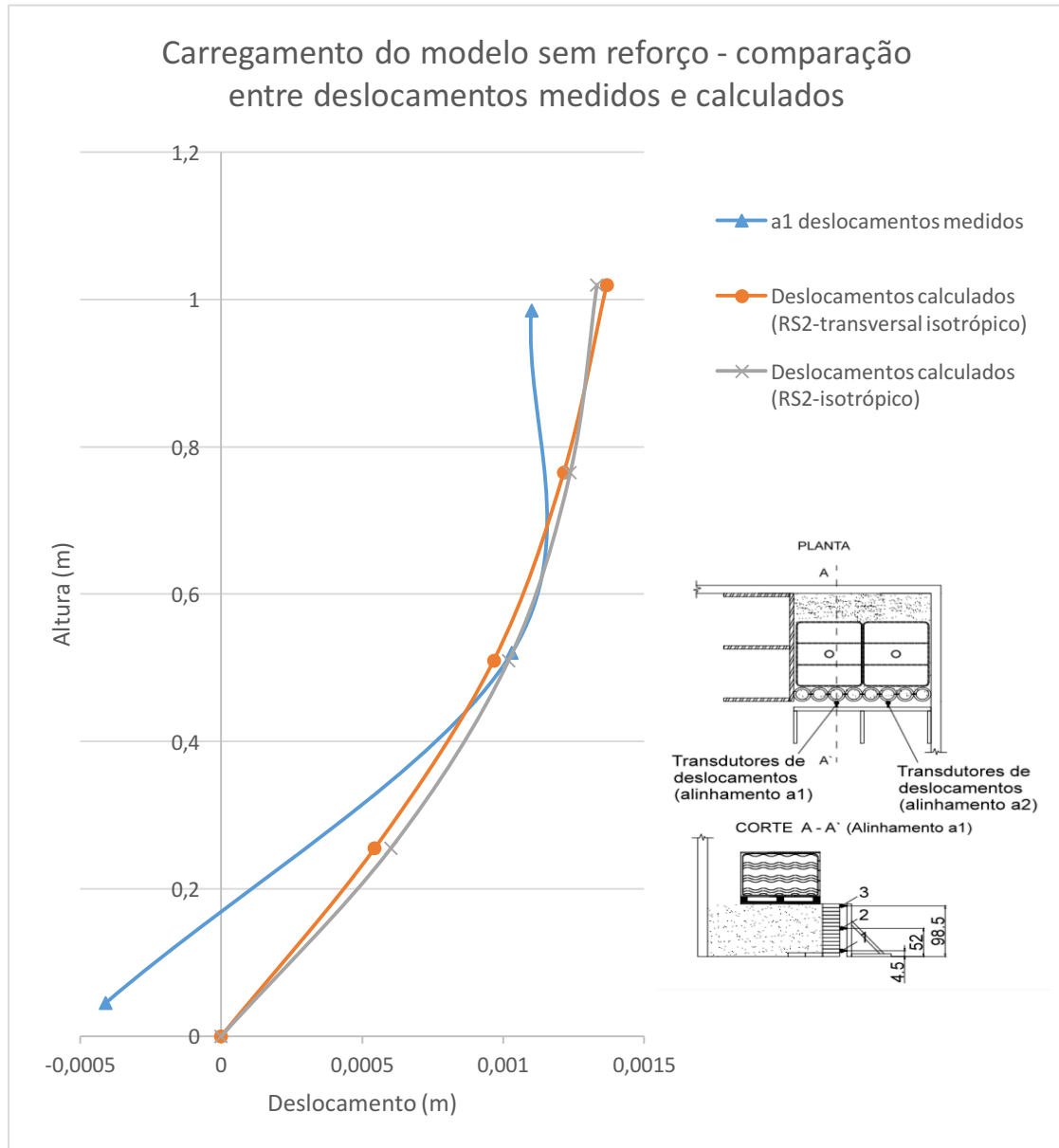


Figura 5.6 – Deslocamentos do paramento do modelo sem reforço superior, na última fase do carregamento com sobrecarga vertical. Comparação entre valores medidos e calculados.

Na Figura 5.7 associam-se os resultados, medidos e calculados, em termos de deslocamentos do paramento, na última fase do carregamento e após a descarga.

Verifica-se uma recuperação significativa dos deslocamentos experimentados, com a respetiva descarga, e uma semelhança nas deformadas, após descarga, entre os valores medidos e calculados.

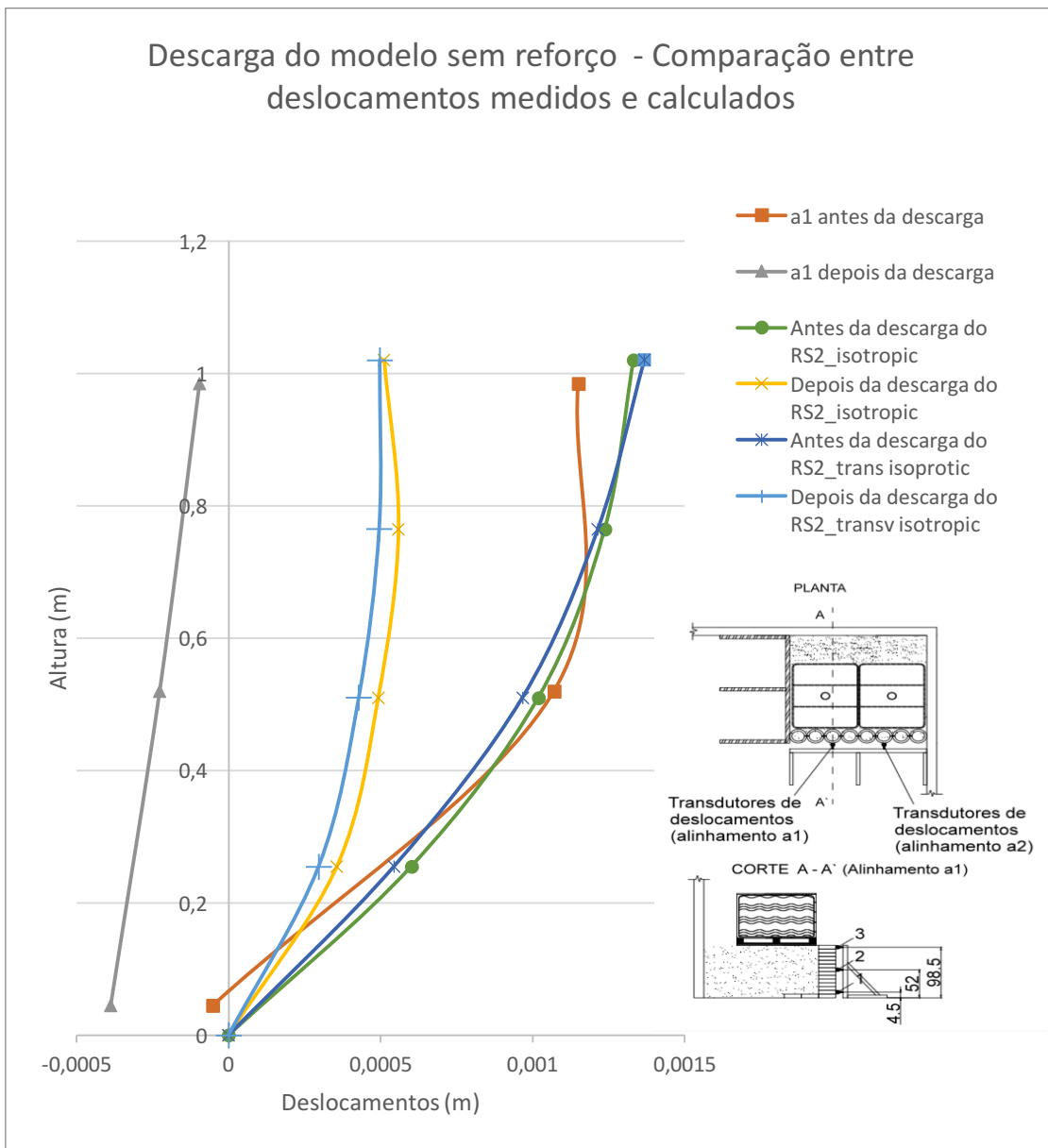


Figura 5.7 – Deslocamentos do paramento do modelo sem reforço superior na última fase do carregamento com sobrecarga vertical e após descarga. Comparação entre valores medidos e calculados.

Introduzido o conjunto de equipamento que permitiu a aplicação da força horizontal na base dos depósitos e, conforme se referiu já, sem alterações na geometria do paramento e do respetivo reforço, aplicou-se novamente a sobrecarga vertical, de forma lenta e progressiva.

Na Figura 5.8 apresenta-se a deformada do paramento para sucessivos valores da tensão aplicada. Verifica-se um aumento dos deslocamentos à medida que a sobrecarga cresce, sendo evidente, no

entanto, a configuração da deformada, que se mantém semelhante, logo a partir dos valores mais baixos da carga.

Curiosa é a diferença entre as deformadas do paramento, para a última fase de carregamento atual com o que foi anteriormente materializado antes da instalação do equipamento para aplicação da força horizontal.

Embora o nível de deslocamentos continue muito baixo, aparentemente, o comportamento do modelo nesta recarga é diferente do exibido no carregamento anterior com a formação de uma concavidade evidente com o deslocamento máximo do paramento a ser atingido no respetivo topo (0,254mm).

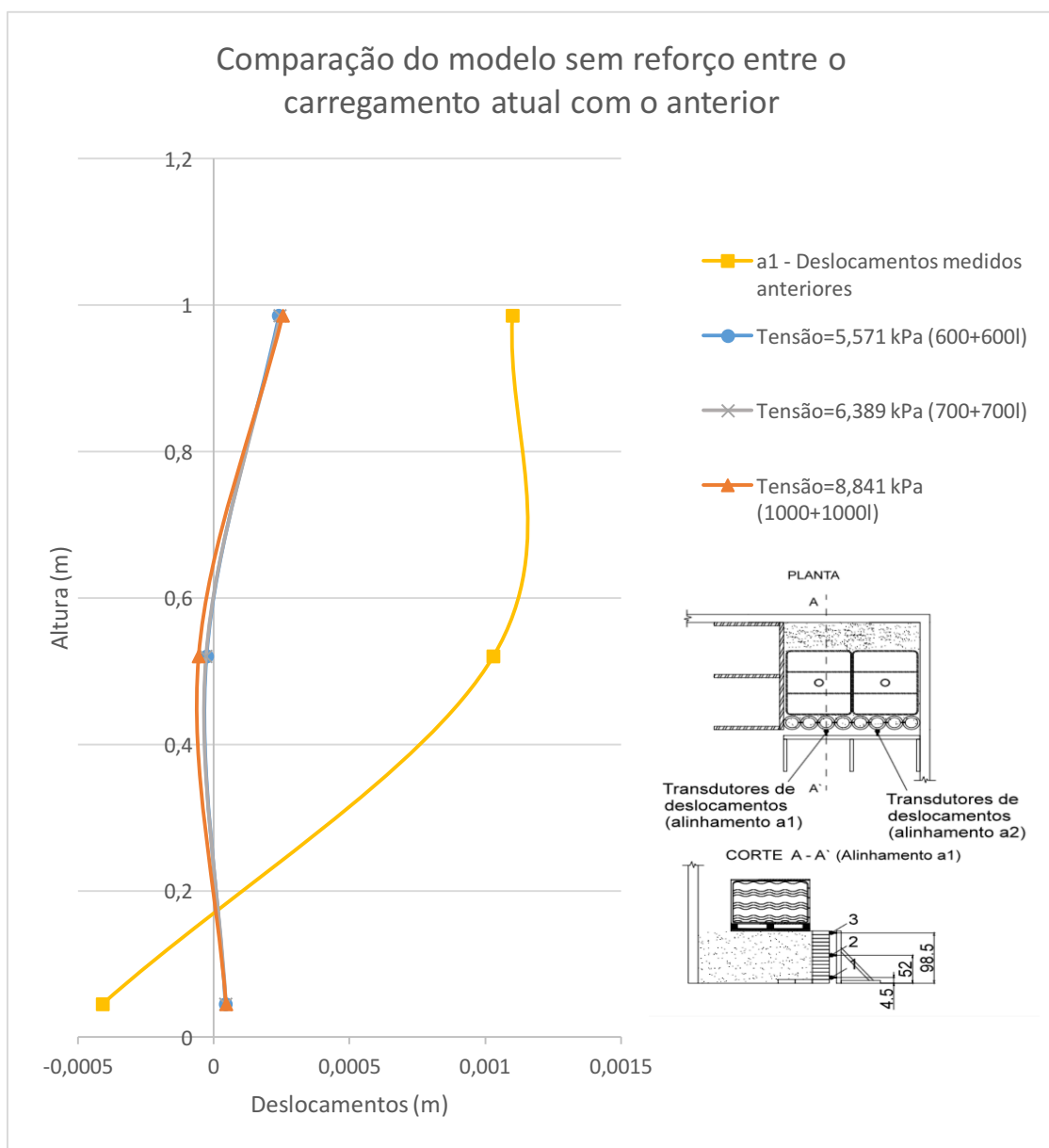


Figura 5.8 – Deslocamentos do paramento do modelo sem reforço superior na última fase do carregamento com sobrecarga vertical. Comparação entre carregamento atual com o anterior.

## CAPÍTULO 5

Nas Figuras 5.9 a 5.13 apresenta-se uma evolução dos deslocamentos do paramento, medidos em diferentes posições com diferentes LVDT, num total de 5. Verifica-se um rápido crescimento do valor da carga aplicada, com deslocamentos do paramento muito próximo de “0”, com o gráfico exibindo um segmento de reta quase vertical.

Para valores de carga aplicada próximos de 7000N, o gráfico começa a apresentar uma curvatura com os deslocamentos, crescendo até valores da ordem de 2mm, enquanto a carga cresce até valores da ordem de 9000N.

A partir deste valor da carga aplicada verifica-se um crescimento dos deslocamentos do paramento sem que seja possível mobilizar acréscimo da carga aplicada.

Será interessante registar que parece ter sido mobilizada a resistência a ações horizontais na interface da madeira com o solo subjacente, para valores de deslocamentos relativos muito baixos (inferiores a 2mm), porque até se mobiliza a resistência a placa não se desloca significativamente e o solo vai-se deformando e, conseqüentemente, o paramento do muro.

Esse valor da resistência, da ordem da máxima carga aplicada (cerca de 9000N) é compatível com o valor da carga vertical aplicada (21219 N) e com um ângulo de atrito mobilizado na interface referida, da ordem de 25 graus.

De facto:

$$2163 \text{ Kg} \times \text{tg}(25^\circ) = 1008,6 \text{ Kgf} = 1008,6 \times 9,81 = 9895 \text{ N} \quad (5.1)$$

valor muito próximo de 9000N.

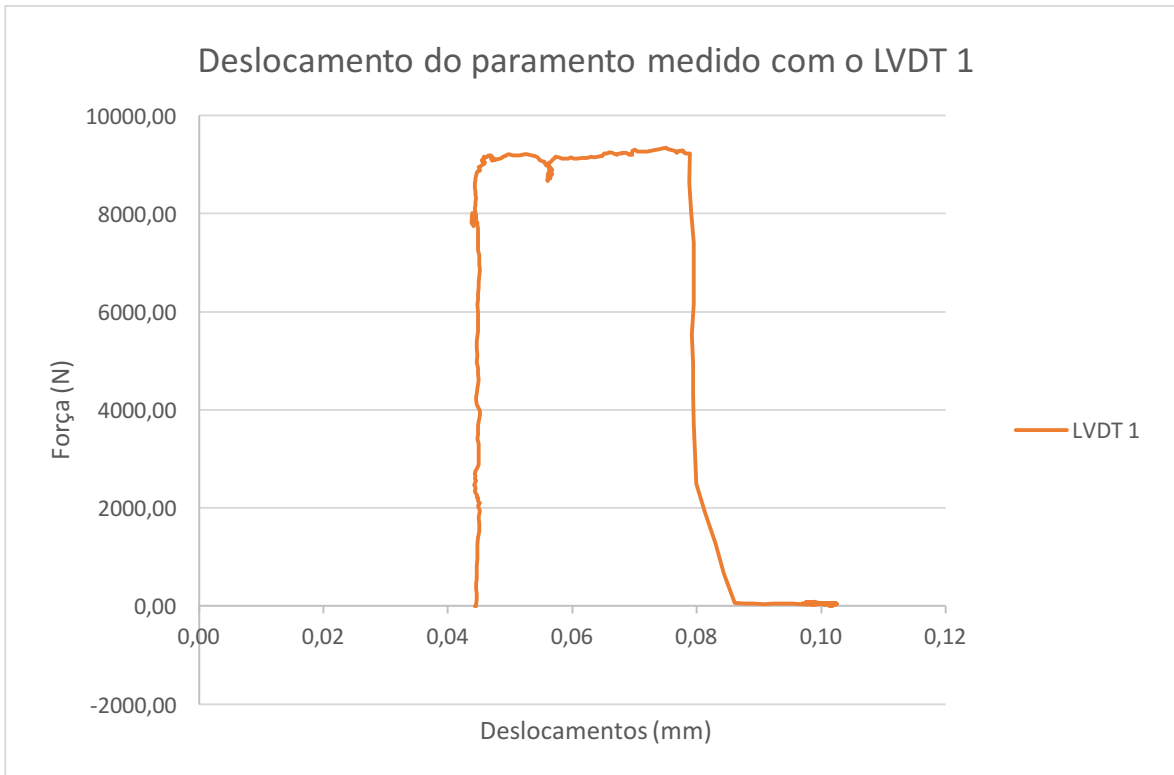


Figura 5.9 – Deslocamento do paramento, com aplicação da força horizontal, medido com o LVDT 1.

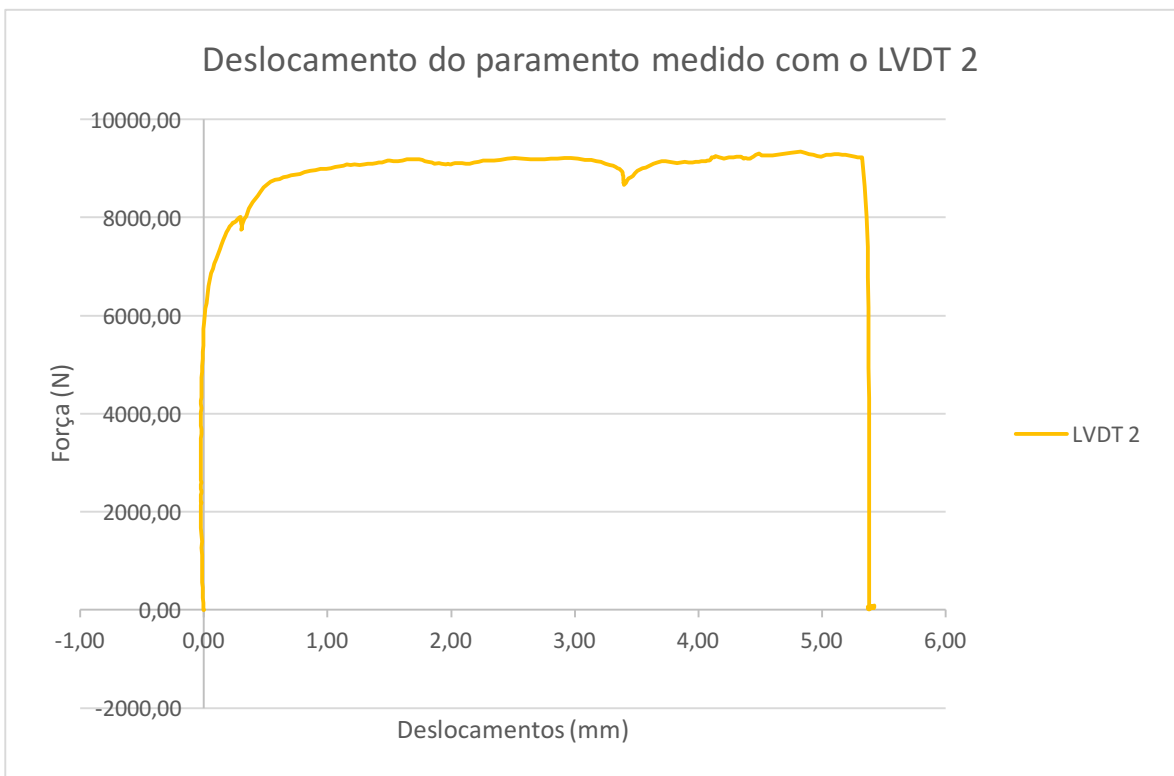


Figura 5.10 - Deslocamento do paramento, com aplicação da força horizontal, medido com o LVDT 2.

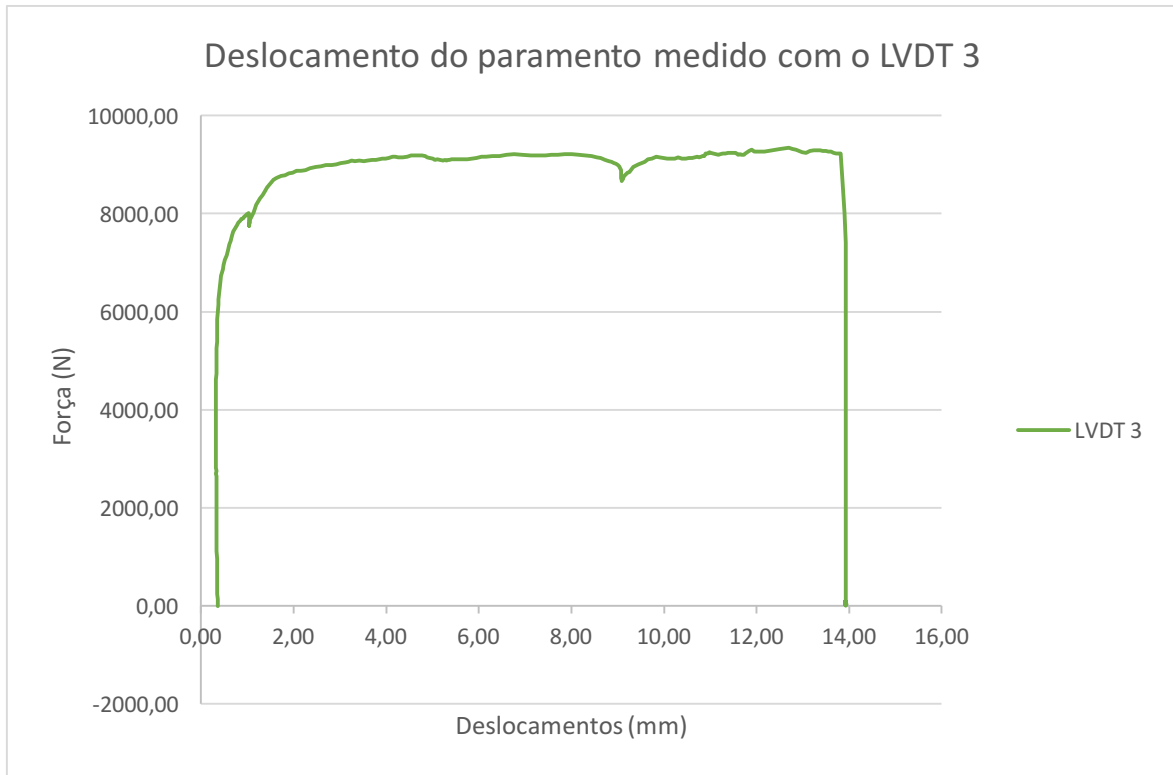


Figura 5.11 - Deslocamento do paramento, com aplicação da força horizontal, medido com o LVDT 3.

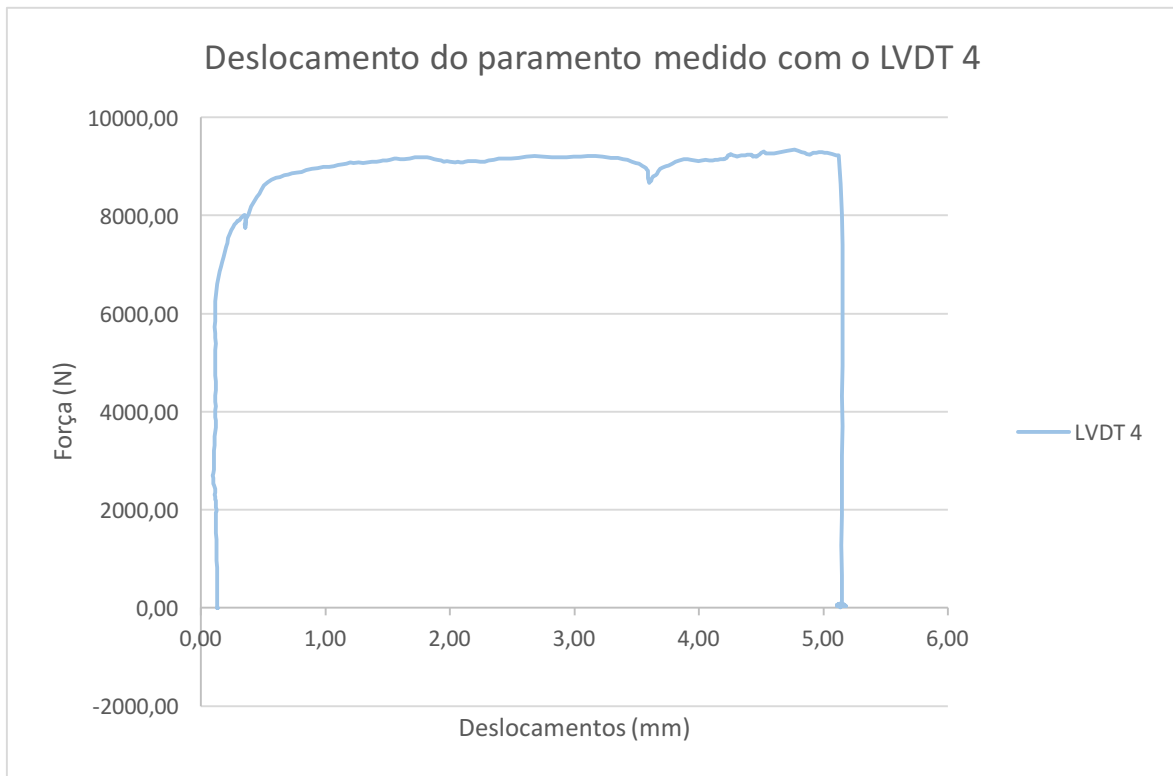


Figura 5.12 - Deslocamento do paramento, com aplicação da força horizontal, medido com o LVDT 4.

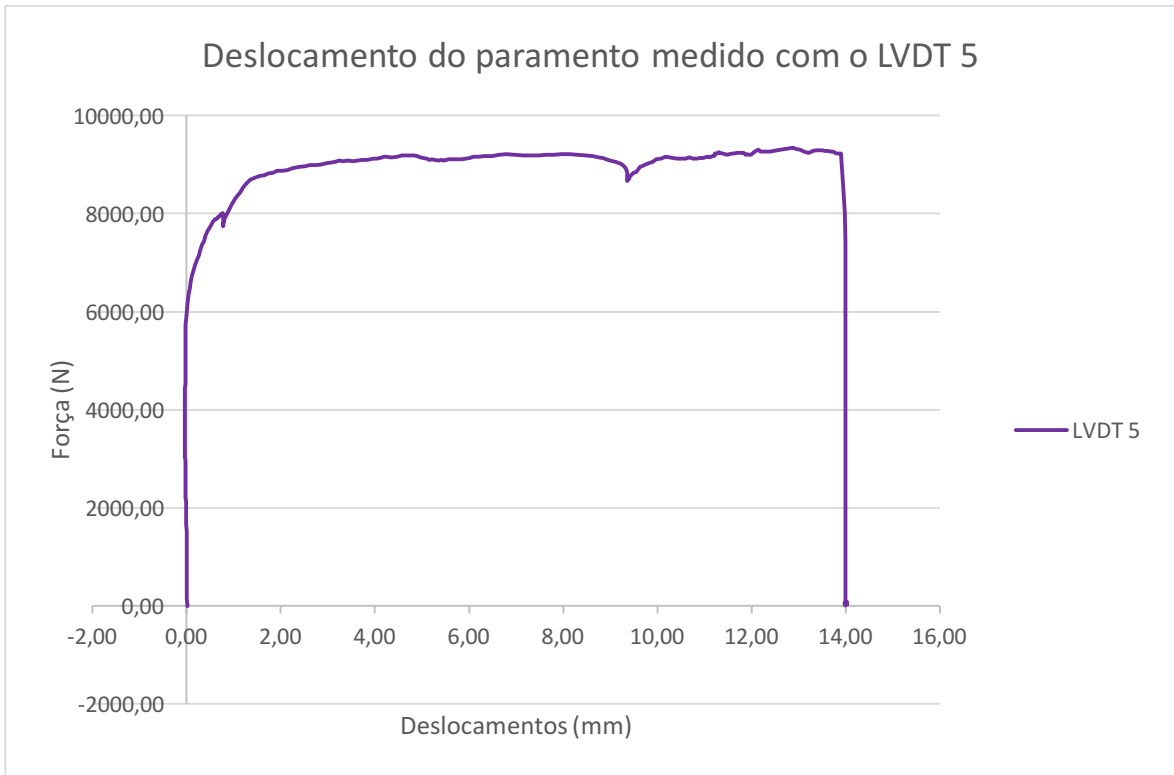


Figura 5.13 - Deslocamento do paramento, com aplicação da força horizontal, medido com o LVDT 5.

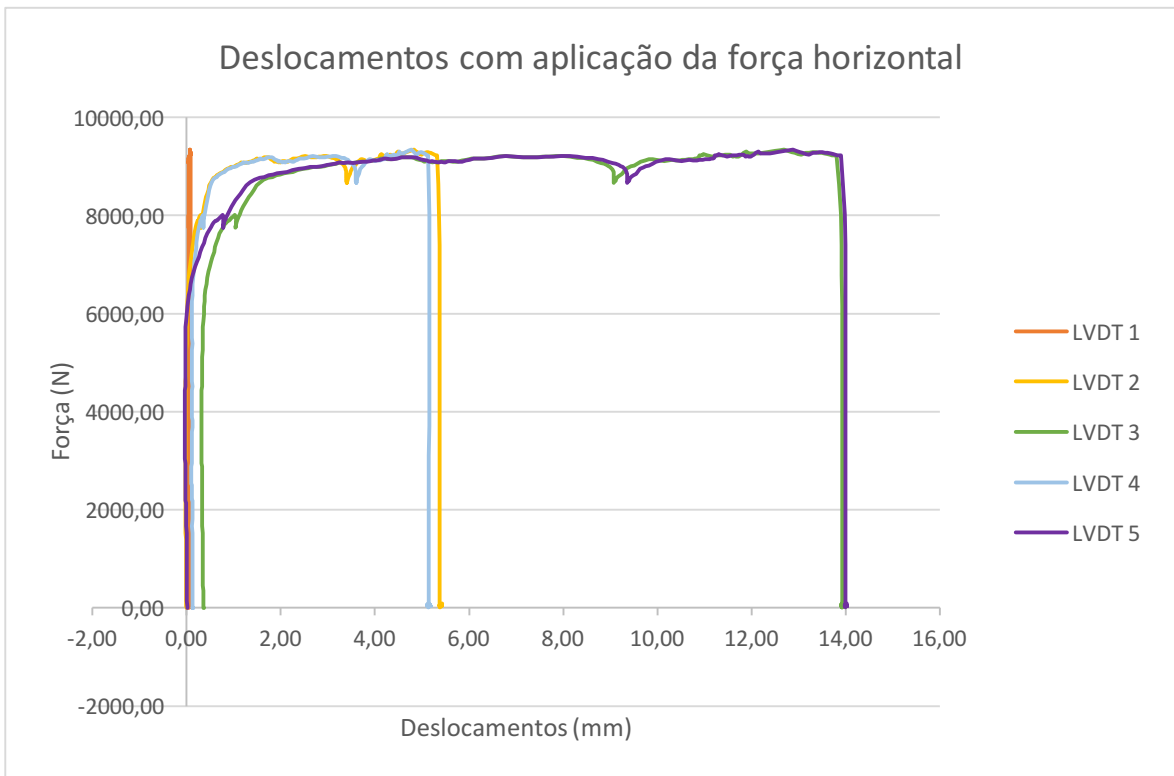


Figura 5.14 - Deslocamentos do paramento com aplicação da força horizontal.

Na Figura 5.15 representam-se os deslocamentos do paramento, em função do tempo decorrido no ensaio em que se aplica a ação horizontal, verificando-se que os deslocamentos vão aumentando, progressivamente, enquanto se mantém a carga horizontal aplicada.

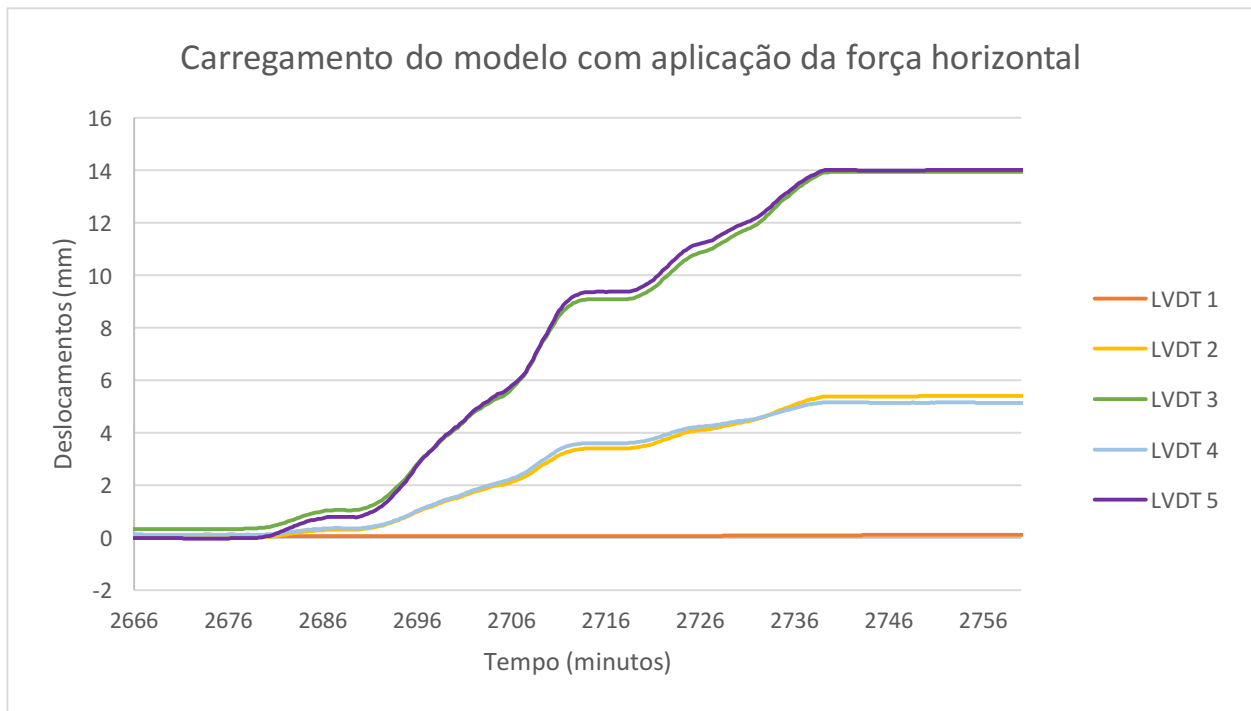


Figura 5.15 – Deslocamentos do paramento com a aplicação da força horizontal em função do tempo.

Na Figura 5.16 apresenta-se a configuração da deformada final do paramento, em termos deslocamentos do alinhamento a1 com valores no topo próximos de 5,053mm e com uma concavidade pouco pronunciada e no alinhamento a2 com deslocamento no topo de 14mm. Esta diferença de valores de deslocamento do alinhamento a1 e a2 é devida à aplicação desta força horizontal que levou a uma rotação da placa que suporta os depósitos e na Figura 5.17 está representado o esquema antes e após a aplicação da força horizontal e onde ilustra essa rotação referida anteriormente.

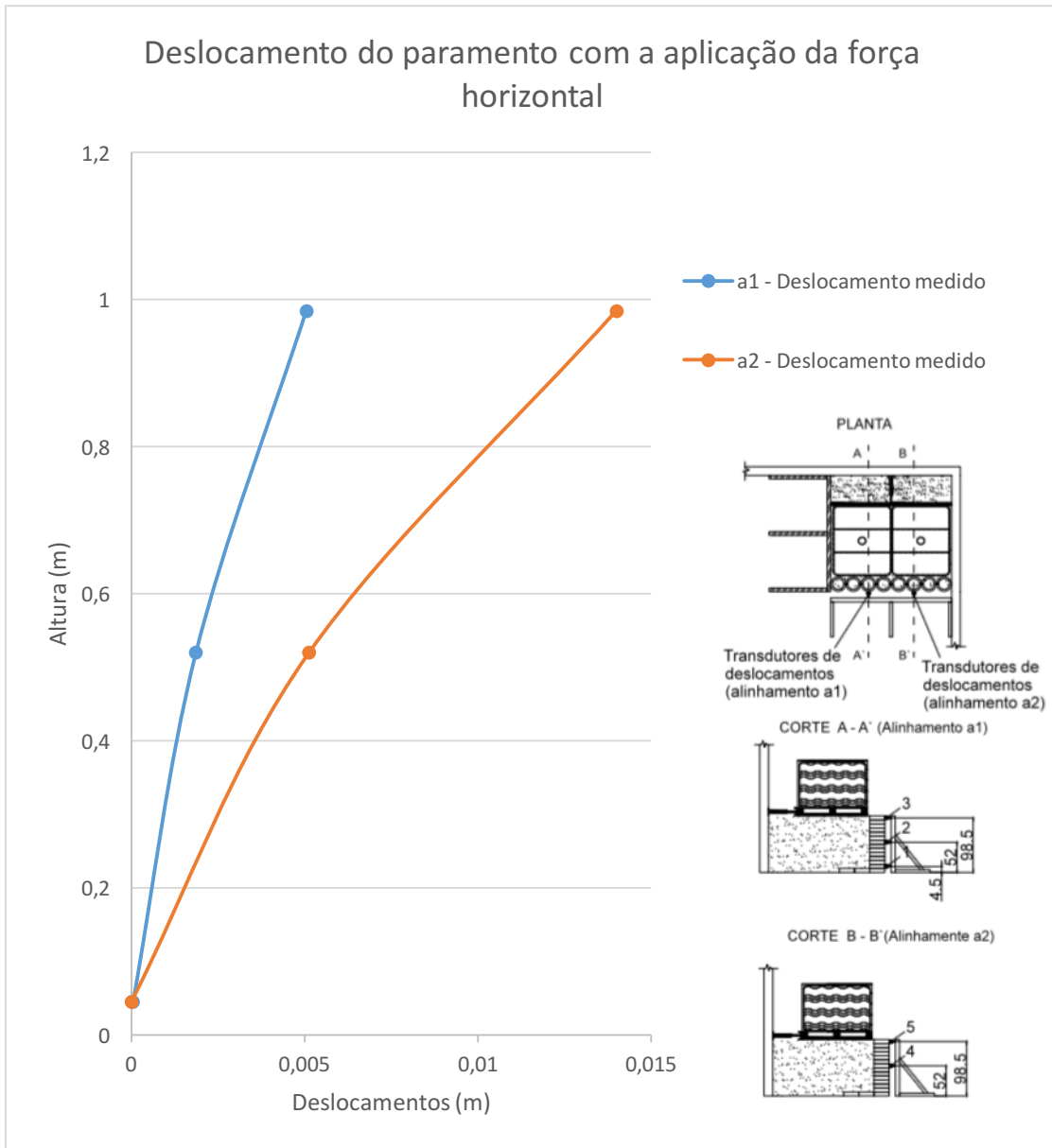


Figura 5.16 –Deslocamentos no final da aplicação da força.

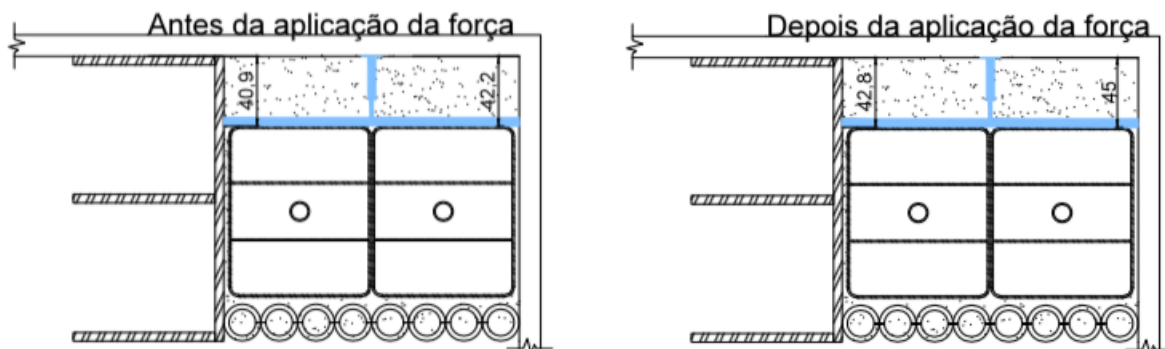


Figura 5.17 – Esquema com o antes e após a aplicação da força horizontal.

Na Figura 5.18 ilustra-se a evolução do valor da força, ao longo do tempo decorrido no ensaio, verificando-se que este vai aumentando, progressivamente, até atingir um patamar de estabilização, após o que ocorre a descarga, quando regressa a 0 o valor da carga aplicada.

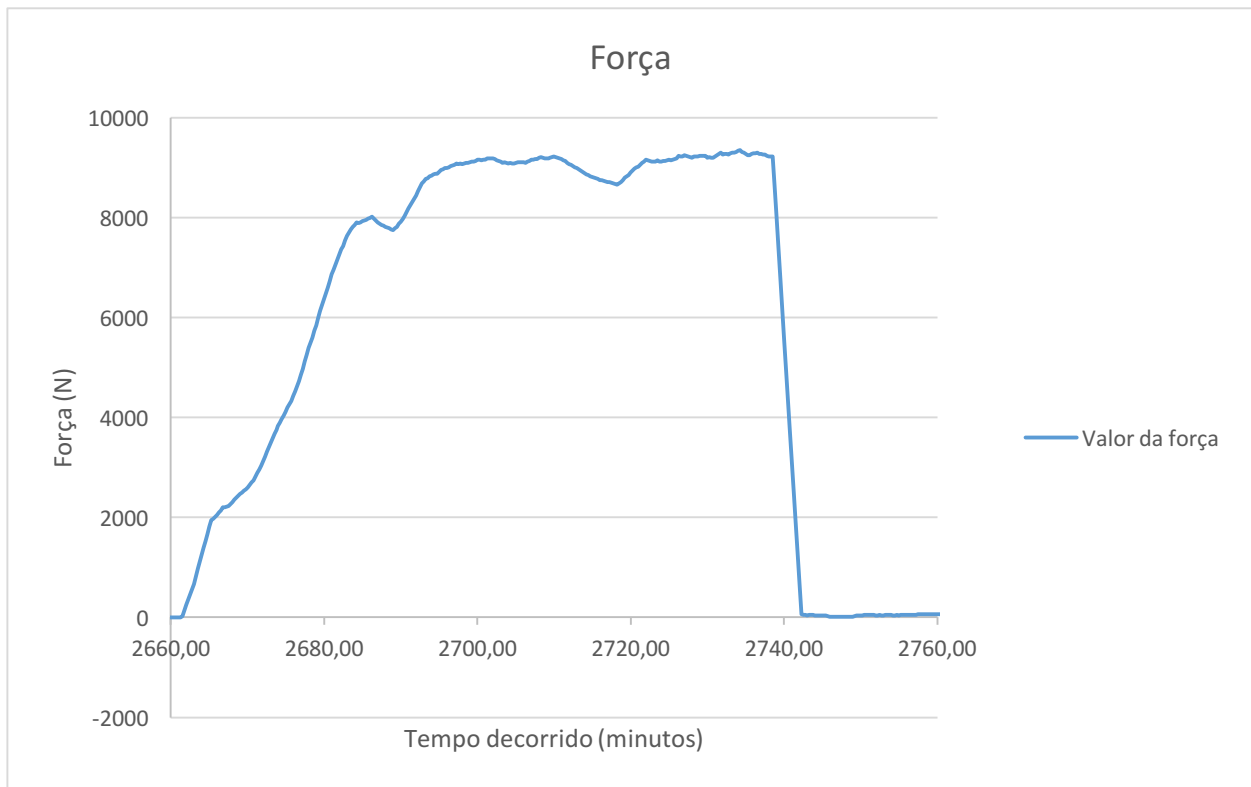


Figura 5.18 – Evolução do valor da força horizontal, ao longo do tempo.

Na Figura 5.19 comparam-se os resultados numéricos obtidos com os valores da instrumentação, em termos de deslocamento do paramento, para o valor máximo da força horizontal. Verifica-se um comportamento semelhante do paramento, embora os resultados numéricos assumam valores inferiores.

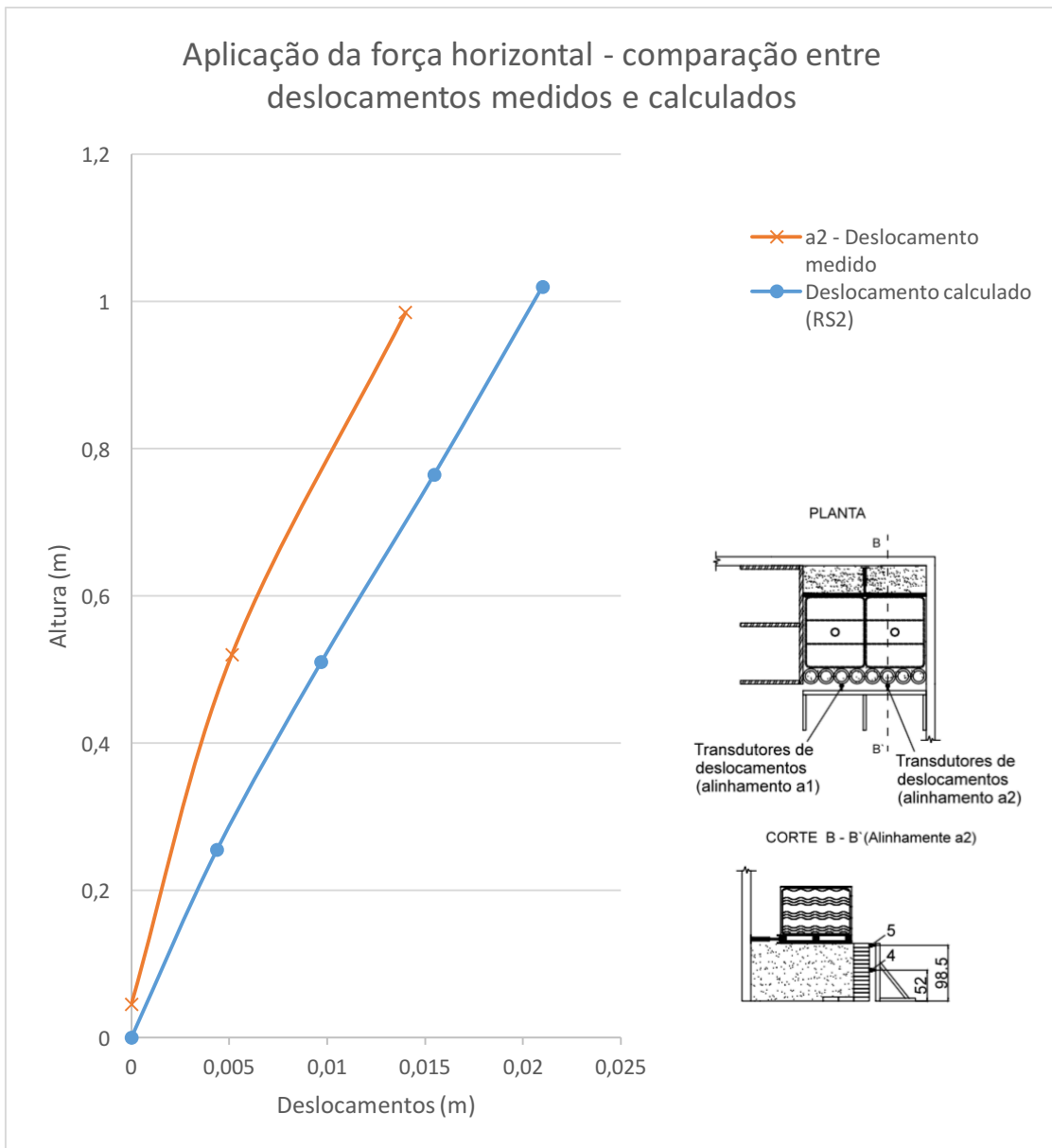


Figura 5.19 – Deslocamentos do paramento do modelo sem reforço superior, na última fase do carregamento, com carga vertical e força horizontal.

Na Figura 5.20 apresentam-se os deslocamentos medidos antes da descarga da força horizontal e após esta ter ocorrido, verificando-se a sua completa recuperação indicando que o comportamento da estrutura é elástico.

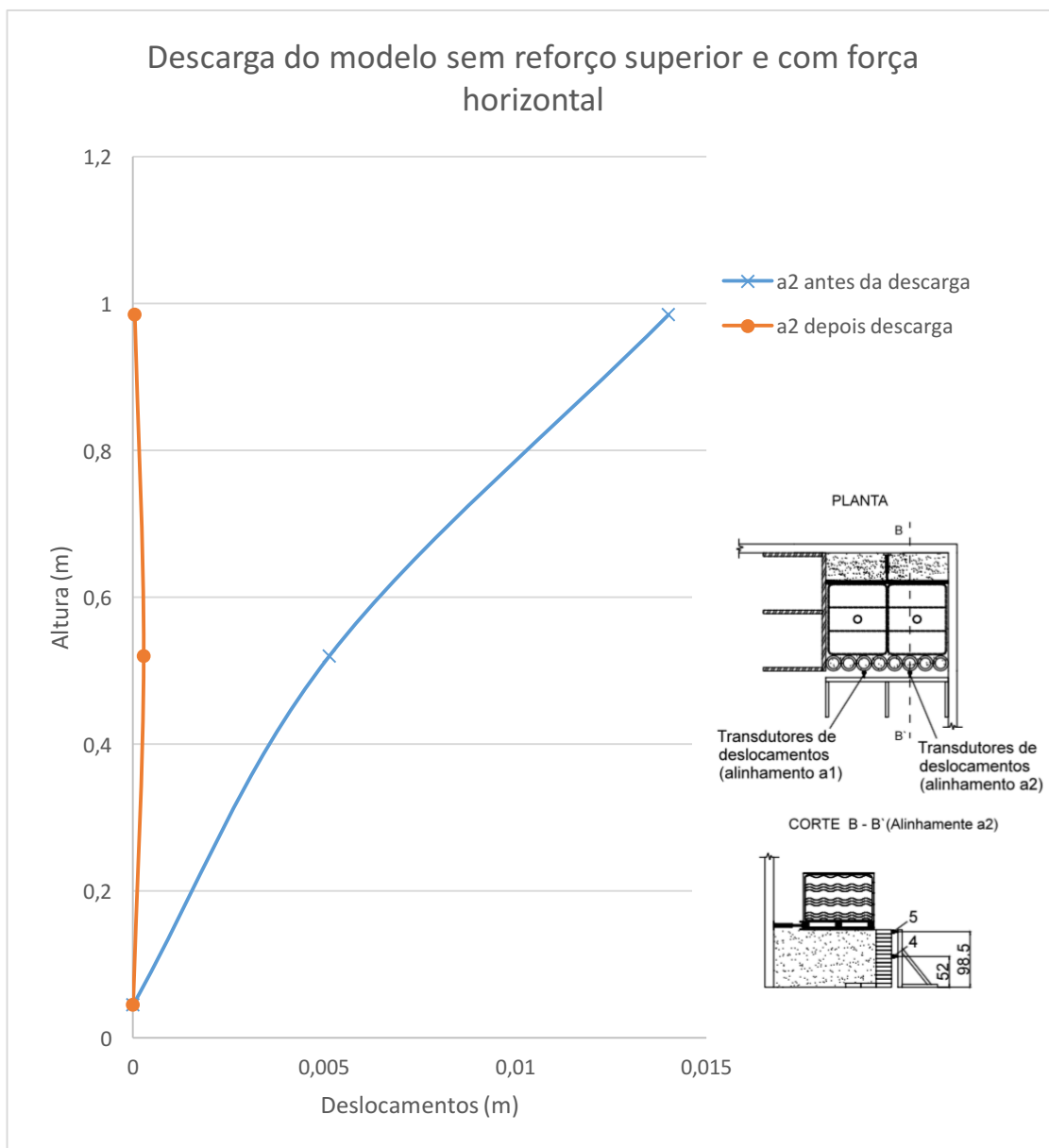


Figura 5.20 – Deslocamentos do paramento do modelo sem reforço superior, na última fase do carregamento, com carga vertical e força horizontal na fase de descarga.

Com a análise feita em termos de deslocamentos obtidos com os modelos físicos e numéricos, cabe agora interpretar os resultados obtidos com as células de carga e com os fornecidos pelo modelo numérico, em termos de tensões verticais.

Na Figura 5.21 apresentam-se os valores das pressões medidas nas células do modelo inicial, ao longo dos meses. Verificando-se uma evolução dos valores medidos nas células o que indica o efeito de fluência do aterro, ou seja, temos o mesmo valor da sobrecarga vertical aplicada, mas ao longo dos meses esse valor vai passando para as células daí esta evolução.

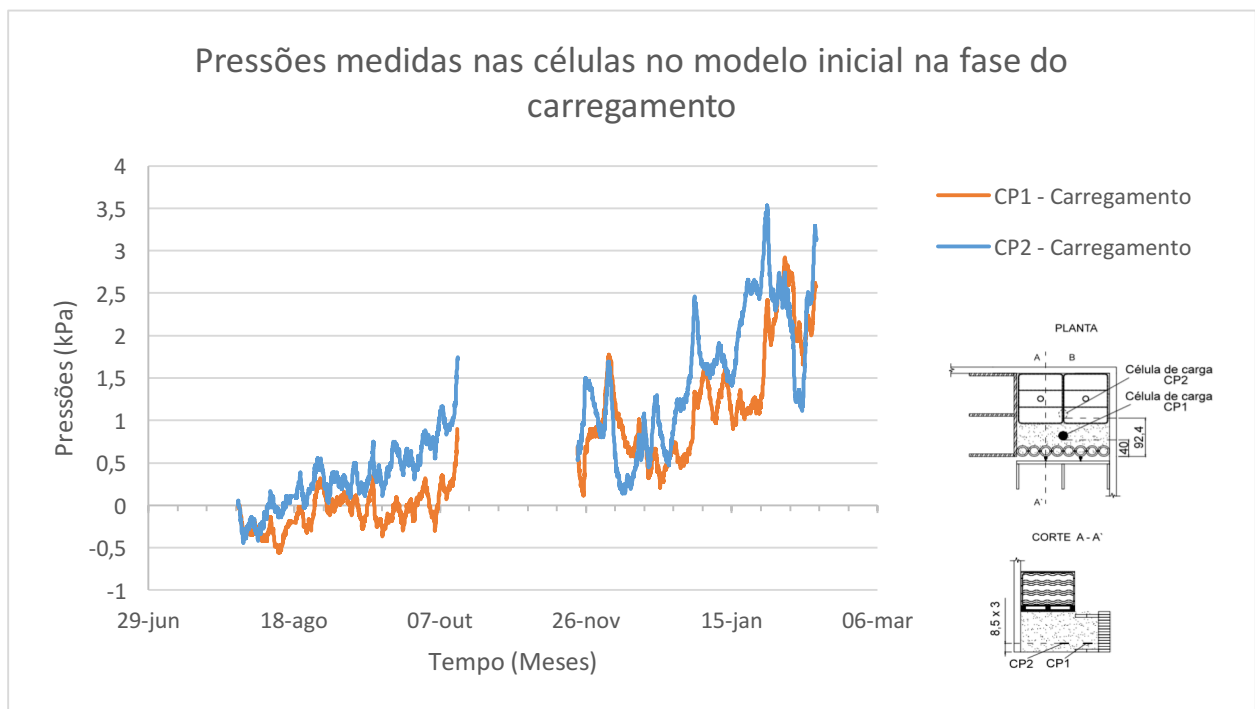


Figura 5.21 – Valores das pressões medidas nas células no modelo inicial.

Na Figura 5.22 apresenta-se um gráfico com a evolução das pressões medidas nas células, na fase de descarga do modelo inicial. Verificando-se que à medida que vamos descarregando os valores medido nas células vão reduzindo.

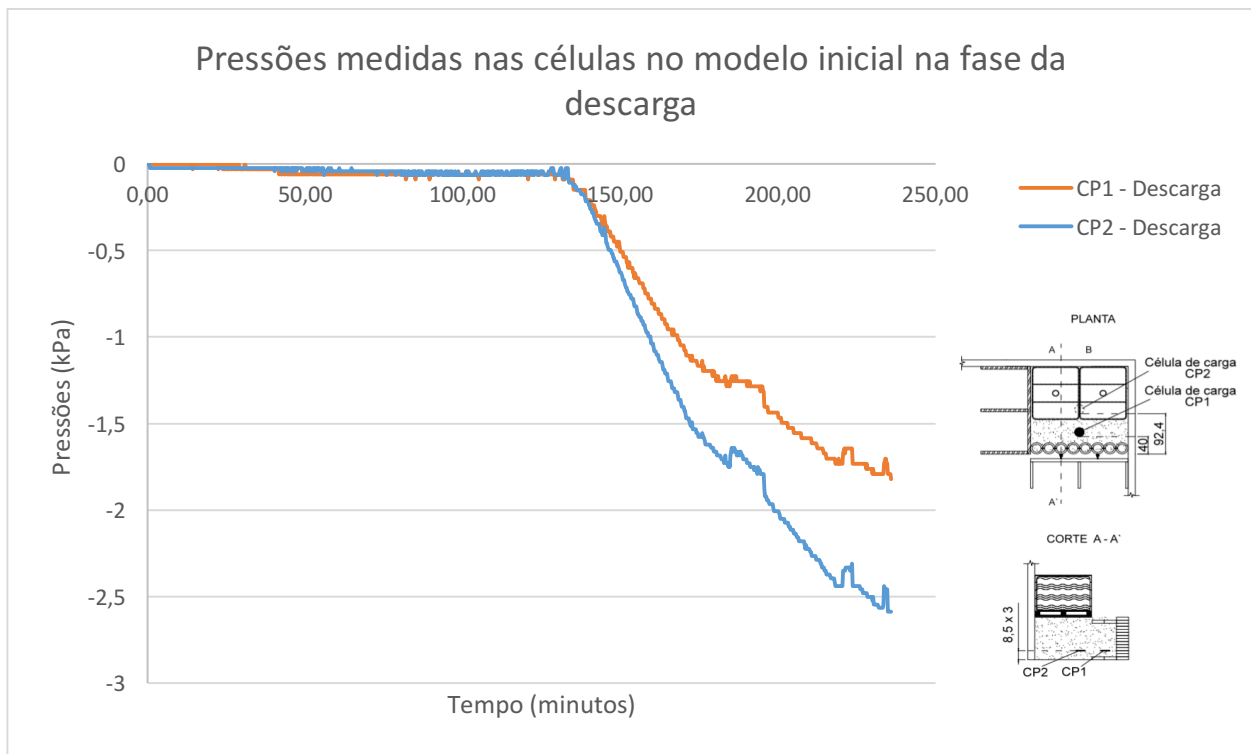


Figura 5.22 –Valores das pressões medidas nas células no modelo inicial na fase de descarga.

Com as modificações introduzidas no modelo, a retirada do reforço superior e a colocação dos depósitos junto ao paramento, apresentam-se nas Figuras 5.23 a 5.25 os valores das pressões totais verticais obtidos na modelação numérica, para diferentes valores da carga aplicada. Verifica-se que à medida que vamos carregando os valores medidos nas células vão aumentando progressivamente.

Os valores máximos das pressões medidas nas células correspondentes à sobrecarga vertical de 3,22 kPa foram iguais a CP1 de 0,0079 MPa e CP2 de 0,0032 MPa, com sobrecarga vertical de 4,754 kPa corresponde a valores máximos de CP1 de 0,0130 MPa e CP2 de 0,0047 MPa e com sobrecarga vertical de 8,841 kPa corresponde a valores máximos de CP1 de 0,030 MPa e CP2 de 0,0086 MPa.

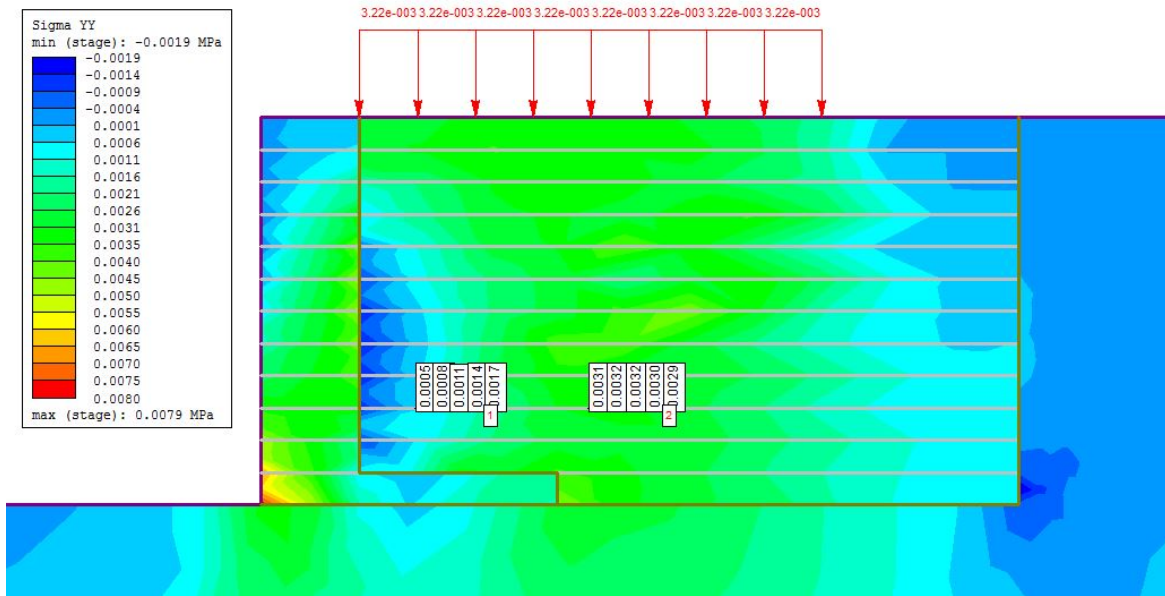


Figura 5.23 – Tensões totais verticais ao nível das células (320+300I).

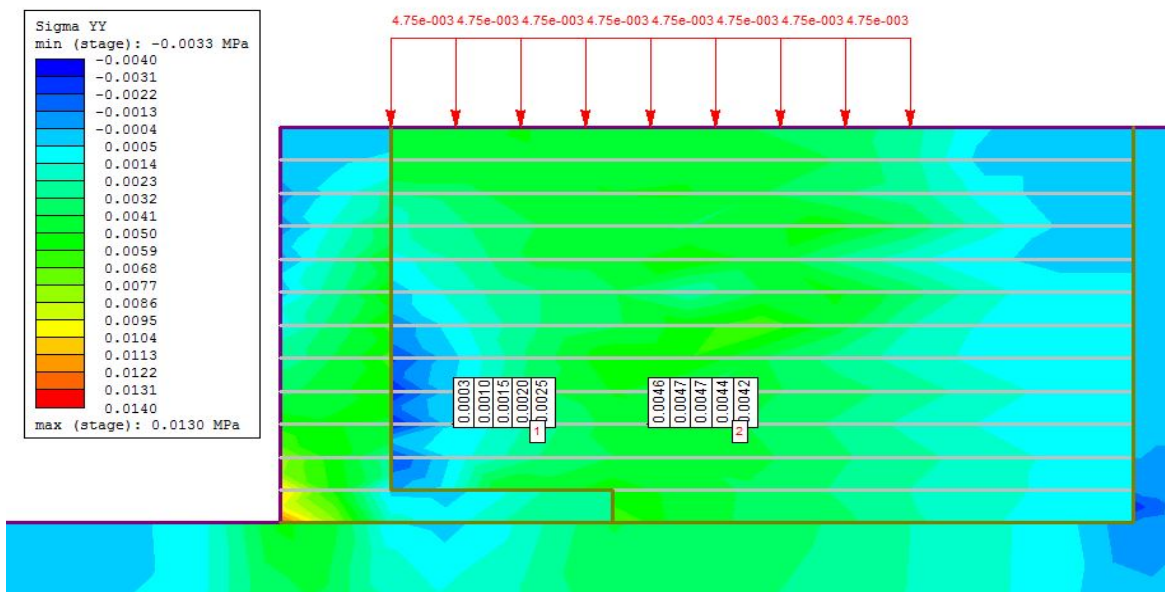


Figura 5.24 - Tensões totais verticais ao nível das células (500+500I).

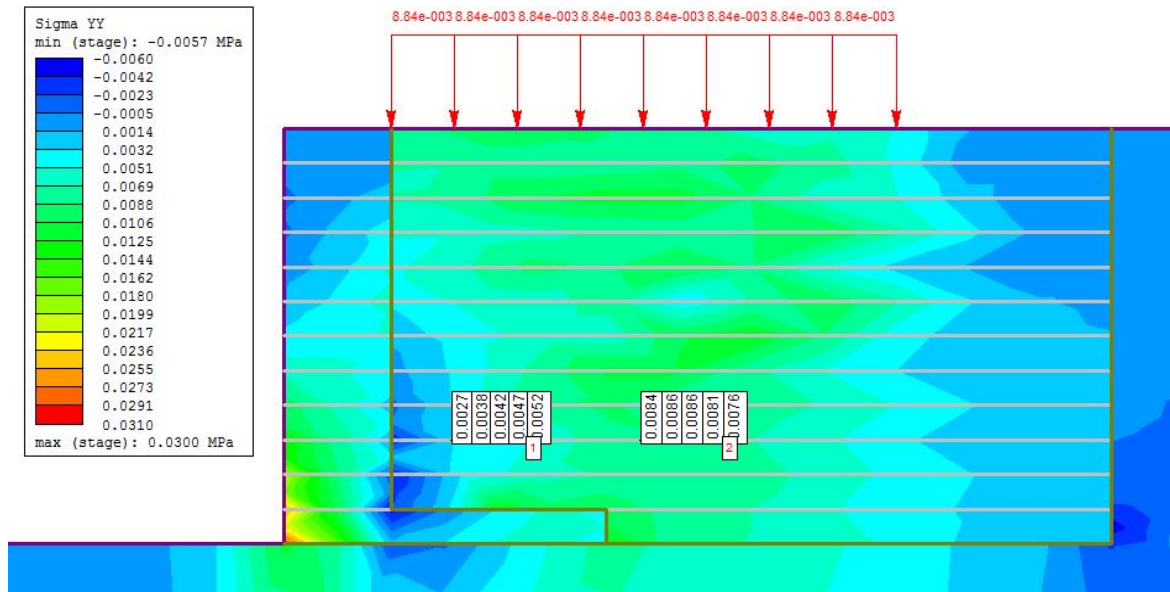


Figura 5.25 - Tensões totais verticais ao nível das células (1000+1000l).

Nas Figuras 5.26 e 5.27 comparam-se os valores das pressões totais verticais obtidos na modelação numérica com os valores correspondentes recolhidos com a instrumentação do modelo físico. Verificando-se que à medida que se aplica a sobrecarga vertical os valores medidos nas células vão aumentando embora os resultados medidos assumam valores inferiores quando comparados com os valores calculados.

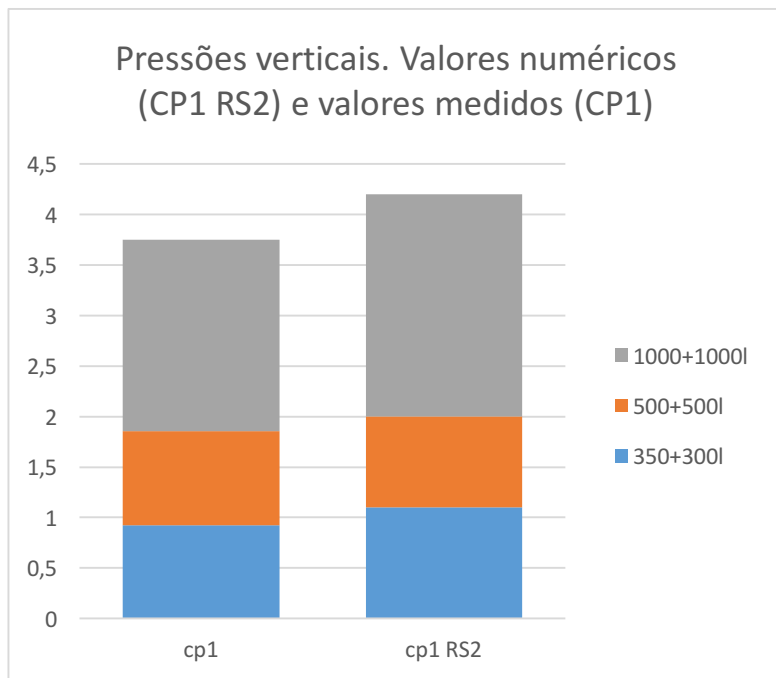


Figura 5.26 – Pressões verticais. Comparação de valores numéricos (CP1 RS2) com valores medidos (CP1).

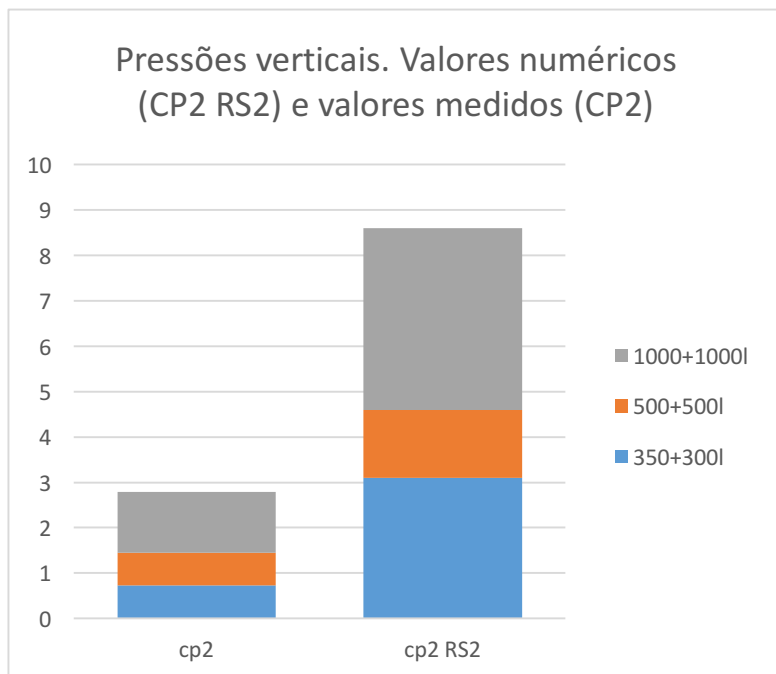


Figura 5.27 – Pressões verticais. Comparação de valores numéricos (CP2 RS2) com valores medidos (CP2).

Em seguida, realizou-se um novo carregamento ao modelo e aplicou-se uma força horizontal. Na Figura 5.28 ilustra-se o início do carregamento e verifica-se com a aplicação da sobrecarga vertical os valores das células vão progredindo até a um nível de estabilização, de seguida, aplicou-se a força horizontal e verifica-se uma nova evolução dos valores das pressões medidas nas células de carga, após ocorrer a descarga da força os valores tendem para valores da sobrecarga aplicada.

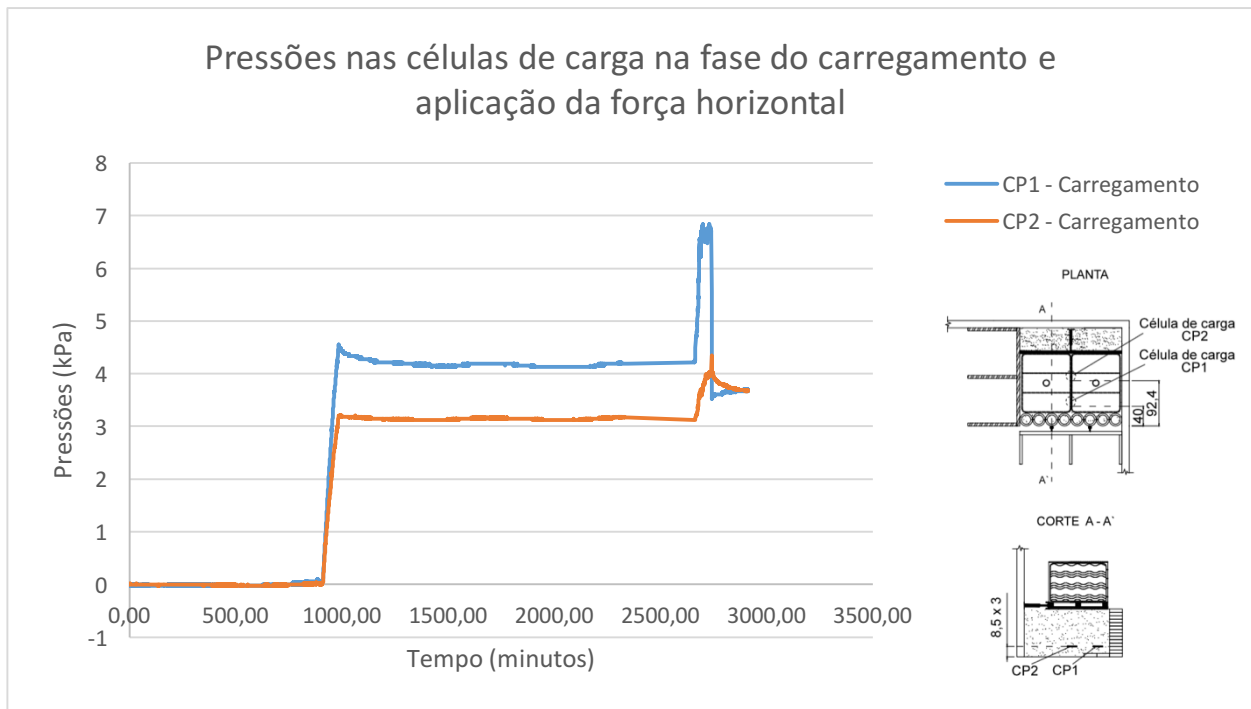


Figura 5.28 – Valores nas células de pressão com a aplicação da força na horizontal.

Na Figura 5.29 apresenta-se um gráfico na fase de carregamento como representa a Figura 5.28, mas isoladamente, verificando-se que à medida que a sobrecarga aumenta os valores das pressões nas células vão aumentando, com tudo, verifica-se também que os resultados das células do CP1, célula que se encontra junto ao paramento atinjam valores superiores à CP2.

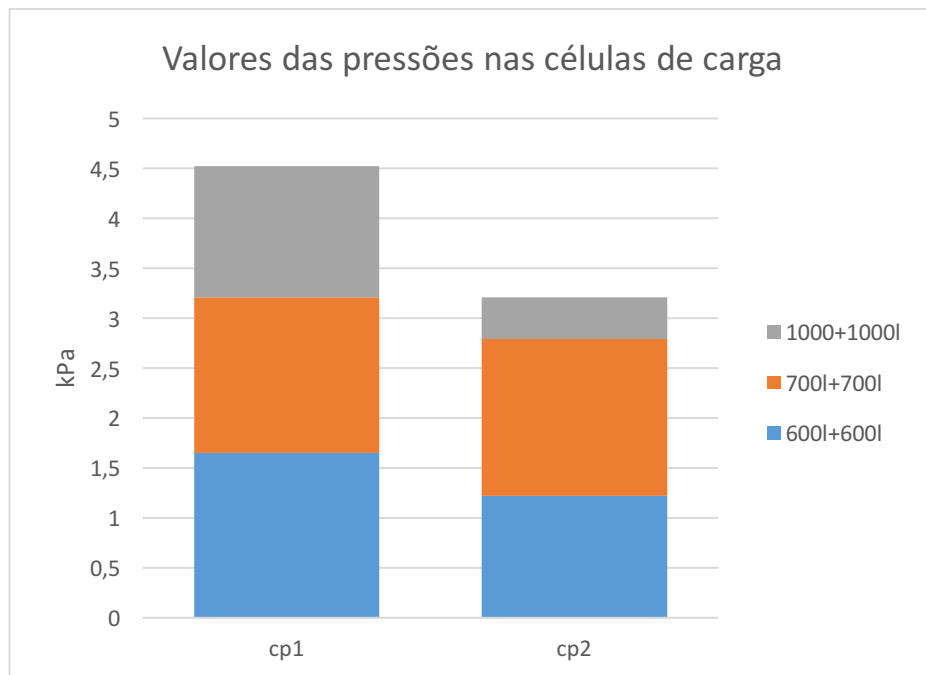


Figura 5.29 – Gráfico com os valores das pressões nas células de carga

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A utilização de pneus em fim de vida em estruturas de suporte de terras é já uma tecnologia com provas dadas na área da construção civil, estando presente em diversas estruturas espalhadas pelo mundo. Em Portugal, no entanto, não são conhecidas aplicações desta tecnologia construtiva com dimensões assinaláveis.

As estruturas de suporte de terras com pneus são usualmente estruturas do tipo gravidade. Trata-se de uma solução económica e sem necessidade de mão-de-obra especializada, principalmente quando comparada com outras tipologias de estruturas de suporte de terras mais correntes.

O estudo realizado permitiu averiguar o comportamento de uma estrutura de solo reforçado com pneus.

Para o efeito, construiu-se um modelo físico à escala reduzida e definiu-se um modelo numérico, com formulação por elementos finitos, recorrendo ao programa de cálculo automático RS2, da Rocscience.

Definiram-se diferentes geometrias do modelo e diferentes esquemas de solitação. À solitação vertical materializada por dois depósitos cheios com água, adicionou-se uma ação horizontal.

O comportamento exibido pela estrutura de solo reforçado caracterizou-se pela manifestação de deslocamentos de reduzida amplitude, revelando-se um conjunto com uma elevada rigidez.

O cruzamento dos resultados numéricos com os obtidos com a instrumentação permitiu calibrar o modelo numérico, de modo a garantir a sua fiabilidade na análise de futuras geometrias e de novos carregamentos.

Numa abordagem futura deverá ser realizado um novo estudo experimental, impondo uma ação horizontal, aplicada diretamente sobre o paramento, de modo a avaliar a rigidez deste elemento estrutural. Esta informação permitirá calibrar melhor o modelo numérico definido.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antunes S.I.M., 2012. Impacto ambiental da produção de placas de isolamento térmico a partir de pneus de reciclagem criogénica. Universidade Nova de Lisboa. (Dissertação de Mestrado).

BENSON, C. H. Using shredded scrap tires in civil and environmental construction. University of Wisconsin. Madison Resource Recycling, v.5, n.2, p. 2-9, Oct, 1995.

Campos P.S., 2006. Aproveitamento Industrial da Borracha Reciclada de Pneus Usados (a reciclagem do resíduo 160103 da L.E.R.). Universidade do Minho. 141pp. (Dissertação de Mestrado).

Chuan L.W., 2008. Use of scrap tyres in earth retaining structures. Universiti Putra Malaysia. (Master of Science).

Costa B.G., 2010. Efeito de Translação do Centro de Rotação na Análise de Muros de Suporte Gravíticos Fundados em Terrenos Compressíveis. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. (Dissertação de Mestrado).

Decreto lei nº111/2001, Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território: Artigo 2º, definições; Artigo 5º: proibições; Artigo 7º: Sistema integrado.

Decreto-lei 43/2004 de 2 de Março, 2004. Diário da República - I Série - A N.º52, 1108 pp.

Fonseca A.P.S, Santos R.P.R., 2016. Muros de Solo Reforçado Com Pneus Construção e Instrumentação do Modelo Físico. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Projeto Integrado da Licenciatura em Engenharia Civil).

Kamimura E., 2002. Potencial de utilização dos resíduos de borracha de pneu pela indústria da construção civil. Universidade Federal de Santa Catarina. (Pós-Graduação).

Magalhães, A.F.C, 2014. Estruturas de Suporte de Terras Executadas com Pneus –Modelo à Escala Reduzida. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia. Instituto Politécnico do Porto.

Melo L.C.M., 2014. Estruturas de Suporte de Terras Executadas Com Pneus. Estudos Paramétricos e Concepção de Protótipo. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Dissertação de Mestrado).

Melo L.R.T., 2011. Monitorização de Modelos Físicos Reduzidos para Investigação do comportamento de Estruturas em Escala Real. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. (Dissertação de Mestrado).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NP EN 1997-1 - Eurocódigo 7, 2010 – Projeto geotécnico, Parte 1: Regras gerais. Comissão Europeia de Normalização.

O'Shaughnessy V., 1997. Reinforcement of Earth Structures Using Scrap Tires. University of Ottawa. 405pp (Tese de Doutorado).

Santos J.G., 2005. O Impacto do Lixo Urbano no Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis - Caso do Concreto Di: Pneus Inservíveis. Universidade Católica de Santos, 165 pp. (Dissertação de Mestrado).

Shumlan V.L., 2004. Tyre Recycling. Repra Review Reports , 15 (7),pp. 3-129.

Sieira A.C., 2009. Geossintéticos e Pneus: Alternativas de Estabilização de Taludes. Engevista, 11, (1), pp. 50-59.

Silva S.A., 2011. Aproveitamento sustentável da borracha proveniente dos pneus usados/Ecodesign uma nova abordagem no design de mobiliário urbano. Universidade do Porto. (Dissertação de Mestrado).

Souza A.N., 2002. Muros de contenção utilizando pneus: análise e alguns comparativos de custos. Universidade Federal Do Rio Grande do Sul. (Dissertação de Mestrado).

Teixeira J.F.P, 2012. Estruturas de suporte de terras executadas com pneus. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Dissertação de Mestrado).

Torres J.M.S.M., 2010. Métodos de observação durante a execução de obras subterrâneas. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Dissertação de Mestrado).

### Sítios da Internet consultados:

1 Milhão de toneladas de pneus valorizados. In: <http://www.valorpneu.pt/>

AB Engineering Manual. In: <http://www.allanblock.com/>

Application of Scrap Tires as Earth Reinforcement for Repair of Tropical Residual Soil Slope. In: <http://citeseerx.ist.psu.edu/>

Aproveitamento do pneu na construção civil. In: <http://www.setorreciclagem.com.br/>

Balço Ambiental, Económico e Social da Gestão de Pneus Usados em Portugal. In: <http://www.valorpneu.pt/>

Barragens de concreto em abobadas com dupla curvatura. In: <http://aquarius.ime.eb.br/>

Como funciona um macaco hidráulico fisicamente. In: <https://princesadosparafusos.wordpress.com>

Construção de estruturas de contenção utilizando pneus inservíveis: análise numérica e caso de obra. In: <http://www.scielo.br/>

- Eco Solutions – Soluções que se distinguem. In: <http://eco.nomia.pt/>
- Eco Solutions – um ambiente mais sustentável. In: <http://automotiverevista.com/>
- EKOCALÇADA, Calçada à portuguesa feita em granulado de borracha de pneus. In: <http://www.valorpneu.pt/>
- Em 2014, mais de metade dos pneus usados tiveram como destino a reciclagem. In: <http://www.valorpneu.pt/>
- End of life tyres a valuable resource with growing potential 2011 edition. In: <http://www.etrma.org/>
- End-of-life Tyre REPORT 2015. In: <http://www.etrma.org/>
- Estruturas de Contenção Muros de Arrimo. In: <http://www.eng.uerj.br/>
- European Tyre & Rubber Industry. Statistics Edition 2014. In: <https://www.mrw.co.uk>
- Geossintéticos e pneus: Alternativas de estabilização de taludes. In: <http://www.uff.br/>
- Granulado de borracha. In: <http://www.valorpneu.pt/>
- How To Make A Retaining Tyre. In: <http://welikesmall.org/>
- Indicadores Valorpneu. In: <http://www.valorpneu.pt/>
- Leonardo souza, Praveen Mhaddolkat, Dr. P Savoikar. Review of Use Soil-concrete-Scrap-Tires-Retaining Walls (SCST-RWS). In: <https://www.academia.edu/>
- Macaco Hidráulico. In: <http://www.macacohidraulico.net/>
- Managing End-of-Life Tires. In: <http://www.EndOfLifeTires-FullReport.org>
- Modelo Operacional e Financeiro. In: <http://www.valorpneu.pt/>
- O impacto da Economia Circular no Sector Nacional dos Resíduos. Ameaças e oportunidades. In: <http://www.esgra.pt/>
- Piezômetros de Corda Vibrante Convencional. In: <http://www.commetro.com.br/>
- Pneus Usados (PU) Principais Resultados de Gestão 2015. In: <https://www.apambiente.pt>
- Pneus Usados. In: <https://www.apambiente.pt>
- Pneus velhos: 8 formas para reciclar. In: <https://www.greenme.com.br/>
- Pneusol.eu.org. In: <https://www.pneusol.eu.org/>
- Quais os pneus abrangidos pelo Sistema Integrado de Gestão de pneus usados. In: <http://www.valorpneu.pt/>
- Recauchutagem. In: <http://www.valorpneu.pt/>

*REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS*

Reciclagem. In: <http://www.valorpneu.pt/>

Relatório de Atividades 2011 Valorpneu. In: <http://www.valorpneu.pt/>

Reutilização para Outros Fins. In: <http://www.valorpneu.pt/>

The pneusol. In: <https://www.pneusol.eu.org>

Transdutores de deslocamento linear. In: <http://www.contenco.com.br/>

Transdutores para medida de deslocamentos lineares. In: <http://www.lem.ep.usp.br/>

Uso sustentável de agregados de borracha de pneus reciclados no setor da construção. In: <https://www.engenhariacivil.com>

UTOPIA. In: <https://engenharia-civil-virtual.blogspot.pt>

Valorpneu em 2016. In: <http://www.valorpneu.pt/>

## **ANEXO I – FICHA TÉCNICA DAS CÉLULAS DE PRESSÃO**



BS EN ISO 9001:2008  
FIA 553710



Bell Lane, Uckfield, East Sussex  
TN22 1QL United Kingdom

t: +44 (0) 1825 765044  
f: +44 (0) 1825 744398

e: info@itmsoil.com  
w: www.itmsoil.com

itmsoil Group Ltd. Registered in England. Number: 4239206. Registered Office: Bell Lane, Uckfield, East Sussex TN22 1QL.

**VIBRATING WIRE INSTRUMENTS CALIBRATION CERTIFICATE**

**Instrument Type** : Vibrating Wire Pressure Cell      **Serial No.** : 047212  
**Instrument Range** : 0.00 to 300.0 kPa      **Calibration Date** : 19/09/2012  
**Gauge Factors in kPa**      **Ambient Temperature** : 20°C  
**Period Gauge Factor (K):** 1393.1420000      **Barometric Pressure** : 1019 mbar  
**Linear Gauge Factor (G):** (kPa/digit)0.1393100      **Calibration Technician** : John Kingshott  
**Polynomial Gauge Factor A:** 0.000000859583100      **Calibration Equipment:**  
Mensor APC 600  
Vibrating Wire Data Recorder DR103  
**Polynomial Gauge Factor B:** -0.1483719000      **Regression Zero** : 6342.0  
**Polynomial Gauge Factor C\*\*:** 906.996200

Applied (kPa)	Reading (Period)	Reading F <sup>2</sup> /1000	Calculated (Linear)	Error %FS (Linear)	Linear Increment	Calculated (Polynomial)	Error %FS (Polynomial)
0.00	3969.4	6346.7	-0.652	-0.22	0.0	-0.052	-0.02
30.00	4039.5	6128.5	29.747	-0.08	-218.2	29.983	-0.01
60.00	4113.1	5910.9	60.061	0.02	-217.6	60.017	0.01
90.00	4190.8	5693.8	90.306	0.10	-217.1	90.063	0.02
120.00	4272.9	5477.1	120.496	0.17	-216.7	120.135	0.04
150.00	4360.6	5259.1	150.866	0.29	-218.0	150.468	0.16
180.00	4447.9	5054.6	179.356	-0.21	-204.5	178.997	-0.33
210.00	4549.3	4831.8	210.395	0.13	-222.8	210.161	0.05
240.00	4653.3	4618.2	240.153	0.05	-213.6	240.118	0.04
270.00	4765.3	4403.7	270.036	0.01	-214.5	270.280	0.09
300.00	4882.9	4194.1	299.236	-0.25	-209.6	299.830	-0.06

Formulae: Linear\*      E = G(R0 - R1)  
Polynomial\*\*      E = AR1<sup>2</sup> + BR1 + C

\* The zero reading should be established on site by the user on installation.  
\*\* The site value of C must be calculated using the formula C = -(AR0<sup>2</sup> + BR0)

The instrument detailed hereon has, as applicable, been tested and calibrated in accordance with procedures, which are part of our ISO 9001:2008 Quality Management System, and unless otherwise indicated, performs within ± 0.50% (Polynomial) as specified. Thus, the instrument conforms in all respects to our relevant specifications and drawings.

Certified:   Line MANAGER





**Calculation of Engineering units from frequency-based units.**

The mathematical relationship between the frequency of vibration of a tensioned wire and the force applying the tension, is an approximate straight line relationship between the square of the measured frequency and the applied force.

Engineering units of measurement maybe derived from the frequency-based units measured by vibrating wire readouts, in 3 traditional ways:-  
From 'Period' units ( $t \times 10^7$ ) and from 'Linear'( $f^2/1000$ ) units using two methods: a simple Linear equation or a Polynomial equation.

**Calculation using 'Period' units.**

The following formula is used for readings in 'Period' units.

$$E = K (10^7/P0^2 - 10^7/P1^2)$$

Where,

- E is the Pressure in resultant Engineering units,
- K is the Period Gauge Factor for units of calibration (from the calibration sheet)
- P0 is the installation Period 'base' or 'zero' reading
- P1 is the current Period reading.

This method of calculation is used by the Soil Instruments Vibrating Wire loggers' (models RO-1-VW-1 or 2 and with serial numbers starting VL or TVL) internal processors', for calculating and displaying directly on the loggers' LCD screen, the required Engineering based units.  
The loggers' require 'Period' base or zero reading units for entering into their channel tables, to calculate and display correctly the required engineering units.

If an Engineering-based unit is required other than the units of calibration, then the correct K factor will have to be calculated using the standard relationship between Engineering units.  
For example, if the units of calculation required were in mH2O and the calibration units were kPa, we can find out that 1kPa is equal to 0.1022mH2O, so we would derive the K factor for mH2O by multiplying the K factor for kPa by 0.1022.  
Please see conversion factors in the user manual or [www.soil.co.uk](http://www.soil.co.uk)

**Calculation using Linear units.**

The following formula is used for readings in 'Linear' units.

$$E = G (R0 - R1)$$

Where,

- E is the resultant Engineering unit,
- G the linear Gauge factor for the units of calibration (from the calibration sheet)
- R0 is the installation Linear 'base' or 'zero' reading
- R1 is the current Linear reading.

Again the Linear gauge factor for units other than the units of calibration would need to be calculated using the same principles as stated in the last paragraph of the 'Period unit' section.

**PTO**

**Linear unit calculation using a Polynomial equation.**

Linear units maybe applied to the following polynomial equation, for calculation of Engineering units to a higher order of accuracy.

$$E = AR1^2 + BR1 + C$$

Where,

E is the resultant Engineering unit

A, B and C the Polynomial Gauge factors A, B and C, from the instrument's calibration sheet

R1 is the current Linear reading.

The value C is an offset value and relates to the zero value experienced by the transducer at the time of calibration. This value should be re-calculated at the installation time as follows:

$$C = - (AR0^2 + BR0)$$

Where,

A and B are as above

R0 is the installation Linear 'base' or 'zero' reading.

Please note that the sign of the re-calculated value of C, should be the same as the original value of C, so if the original is negative then the recalculated value should also be negative.

Conversion to engineering units other than the units of calibration, would best be done after conversion, using a factor calculated using the same principles as stated in the last paragraph of the 'Period unit' section.



## **ANEXO II – FICHA TÉCNICA DO DATATAKER**



**dataTaker®**

Data Acquisition and Data Logging Systems

www.datataker.com

**GeoLogger DT515 & DT615 Series 3**

**Specifications**

- Geotechnical Low Power Data Logger
- 10-30 Sensor Channels, 7 Digital Channels
- Vibrating Wire Sensor Support
- Unique Universal Channels
- Up to 1,390,000 Data Points
- PC Card for Data Storage
- Easily Configurable Windows Based Software
- Stand Alone and Real Time Data Acquisition
- Remote Monitoring and Control
- Removable Screw Terminals
- Expandable

**Datataker's Extensive Range**

Datataker's extensive range of data acquisition and data logging systems are real time and stand alone, able to acquire, process and log data without direct computer control. The powerful yet easy-to-use hardware and software enables you to log a wide range of measurements and events. *dataTakers* are in use in over 50 countries - *dataTakers* are used in many applications including science, aerospace, mining, manufacturing, meteorology, agriforestry, hydrography, research & development, public utilities, petrochemical and transportation.

**The Geotechnical Data Loggers**

There are two versions of the GeoLogger, the *dataTaker DT515* and *DT615*. Both units feature easy set up, 10 to 30 analog channels, 7 digital and counter channels, Vibrating Wire Sensor Support with 500Hz to 5 kHz frequency range and unique phase lock loop filtering.

Data can be conveniently and securely stored in battery backed RAM and removable PC cards storing up to 1,390,000 data points respectively. Alarms may also be set for all channels.

The *DT515* and *DT615* are of a rugged steel construction making the units suitable for harsh environments. In addition, the *DT615* also features a display and keypad for viewing channel data, alarm status and system information. Programmable function keys allow keypad control over the unit's operation.

**The dataTaker Windows Based Software**

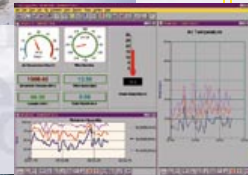
Datataker produces a number of software packages for interfacing with the *dataTaker* data logger range. DeTransfer provides a text-based interface for programming and management, with simple plotting provided by the DePlot utility. DeLogger4 is our standard GUI (Graphical User Interface) for 'drag and drop' programming, spreadsheet presentation of data, plotting of charts and simple mimics. DeLogger4 Pro is the enhanced graphical package including additional automation, reporting, database and remote *dataTaker* management features.

**Applications**

Applications for the *dataTaker* GeoLogger range include:

- Concrete Structural Testing
- Dam Wall Stability Monitoring
- Subway Construction Site Monitoring
- Machinery Condition Monitoring
- Tunnel Monitoring
- Soil Slope Stability Monitoring

For your application contact your local *dataTaker* office or your local dealer.



**Head Office**

Australia  
Datataker Pty Ltd  
7 Seismic Court  
Rowville Melbourne  
Victoria 3178  
Tel: +61 3 9764 8600  
Fax: +61 3 9764 8997  
Email: sales@datataker.com.au



United Kingdom  
Grant Instruments (Cambridge) Ltd  
Shepreth  
Cambridgeshire  
SG8 6GB  
Tel: +44 (0) 1763 264780  
Fax: +44 (0) 1763 262410  
Email: sales@datataker.co.uk



United States of America  
Computer Aided Solutions  
8588 Mayfield Rd, Suite One  
Chesterland, OH 44026  
Tel: +1 800 9 LOGGER  
Tel: +1 440 729 2570  
Fax: +1 413 375 6137  
Email: sales@datataker.com



**Analog Channels**

**Channel Number**

Number of input channels depends on sensor wiring configuration. Sensor configurations may be mixed:  
 Two wire: 10  
 Two wire with one shared terminal: 30  
 Three wire: 10  
 Four wire: 10  
 Expansion: by external CEM modules

**Fundamental Input Ranges**

Full Scale	Resolution	Full Scale	Resolution
±25 mVdc	2 µV	50 Ω	.25 mΩ
±250 mVdc	20 µV	500 Ω	2.5 mΩ
±2.5 Vdc	200 µV	5,000 Ω	25 mΩ
±100 Vdc	500 µV	100 Hz	0.01 %
±0.25 mA	0.2 µA	10 kHz	0.01 %
±2.5 mA	1 µA		
±25 mA	10 µA		

**Accuracy**

Measurement at	25°C	-45°C to 60°C
DC Voltage	0.15%	0.25%
DC Current	0.25%	0.35%
DC Resistance	0.20%	0.30%

**Sensor Excitation**

Per channel: 4.5V, 250µA or 2.5mA  
 DC voltage: 5V at 100mA switched

**Multiplexer (Channel Selector)**

Type: relay ±100V input  
 Common mode range: ±100V (100V range only)  
 ±3.5V on other ranges

Input impedance: 1MΩ or >100MΩ, programmable

**Sampling**

Sampling for accuracy and noise rejection by integrating over 50/60Hz line period  
 Maximum sample speed: 25Hz  
 Effective resolution: 15 bits  
 Linearity: 0.01%  
 Common mode rejection 25mV range: >90dB  
 Line (50/60Hz) series mode rejection: >35dB

**Internal Channels**

Temperature (thermocouple reference junction): 1  
 Reference voltage channels: 1  
 Internal battery voltage: 1

**Sensor Support**

Supports a wide range of sensor types including, but not limited to the following:

**Vibrating Wire**

Frequency range: 500 to 5kHz  
 Coil resistance: 50 to 200Ω  
 Stimulation method: single pulse pluck

**Thermocouples**

Types: B, C, D, E, G, J, K, N, R, S, T  
 Reference junction compensation accuracy:

Case temperature	25°C	-20 to +60°C
Accuracy	±1.0°C	±1.5°C

**RTDs**

Types: Pt, Ni, Cu  
 Resistance range: 10Ω to 2kΩ  
 Measurement accuracy:  
 4 wire: 0.15% of resistance  
 3 wire: 0.25% of resistance

**Thermistors**

Types: YSI 400xx Series  
 Resistance range: <7kΩ,  
 <20kΩ with parallel resistor

**Monolithic Temperature Sensors**

Types supported: LM34, LM35, AD590

**Bridge Sensors**

Configurations: 4-wire and 6-wire  
 Bridge completion: external or internal half bridge

**4-20mA Current Loops**

Shunt value: 100Ω to a shared common  
 Accuracy: 0.25% at 25°C

**Sensors - Comments**

A wide range of sensor scaling and linearising facilities is provided including polynomials, expressions and functions

**Digital Channels**

Number of channels: Bi-directional channels: 4  
 Dedicated counter channels: 3  
 Analog channels may also be used for digital input

**Digital Input**

Number: 4, shared with output channels  
 Input Type: logic level (protected with pull-up)

**Counter Channels**

Number: 4 low-speed (10Hz) shared with input channels  
 3 high-speed (1kHz in sleep mode) with switchable internal clocking options  
 Size: 16 bit (65535 counts)

**Digital Output**

Number: 4 shared with input channels  
 Output type: open-collector npn transistor, +30V, 100mA

**Calculation Channels**

Any expression involving variables and functions including: sin(), cos(), tan(), asin(), acos(), atan(), abs(), sqrt(), average, maximum, minimum, time of max., time of min., variance, integral, histogram

**Scheduling of Data Acquisition**

Number of schedules: 4 acquisition schedules,  
 1 immediate schedule  
 1 alarm schedule

Scan triggers: time base or digital event  
 Conditional scanning: while digital input high  
 Time based scheduling: from seconds to months in increments of 1 second, 1 minute, 1 hour and 1 day  
 Maximum scheduled rate: 1 second or as fast as possible, typically 25 samples per second  
 Dynamic scan time base change: yes  
 Maximum number of channel entries: 110

**Alarms**

Condition: high, low, within range and outside range  
 Delay: optional time period for alarm response  
 Actions: set digital outputs, execute any commands.  
 Alarms can be combined in logical fashion

**Data Storage**

**Internal**  
 Type: battery backed SRAM  
 Capacity: 166,530 data points

**PC Card**

Types: SRAM up to 4 MByte, Type 1  
 Card voltage: 5V types  
 Capacity: up to 1,390,000 data points  
 Data format: proprietary

**Download Data Format**

Format: ASCII floating point, fixed point or exponential formats  
 Compatibility: spread sheets, word processors, graphing packages, statistical programs and SCADA software

**Serial Interface (RS232)**

The GeoLogger is programmed and data extracted via the RS232 serial interface  
 Speed: 300 to 9600 baud (9600 default)  
 Handshake: XON and XOFF  
 Wake from sleep: yes  
 Isolation: 500V

Compatibility: computers, modems, satellite-modems, radio-modems and printers

**Network Interface**

**(Multiple dataTaker only)**

Standard: RS485  
 Protocol: proprietary with error correction  
 Speed: 1200 Baud  
 Distance: 1000 meter maximum

**System**

**Display and Keypad**

Models: DT615 only  
 Type: LCD, 2 lines by 16 characters, back light  
 Display functions: channel data, alarms, battery status, data capacity  
 Key pad: 5 keys for scrolling, function execution  
 Beeper: for alarms, etc  
 Indicator LED's: 3 programmable

**Real Time Clock**

For time stamping of data, scheduling and timers  
 Normal resolution: 1 second  
 Accuracy: 2 seconds per day (25°C)

**Power Supply**

Voltage range: 11 to 24Vdc or 9 to 18Vac

**Power Consumption**

In normal mode: 1W (2W with battery charging)  
 Sleeping: 2mW (350µA from battery)  
 Typical low power operation: 20mW

**Internal Main Battery**

Chemistry: lead acid gel cell  
 Voltage (capacity): 6V (1.2 Ahr)  
 Temperature compensation: -10°C to +70°C  
 Operating time: Normal: approx. 10 hours  
 Low power: approx. 4 months

**Internal Backup Battery**

For real time clock and internal data storage backup  
 Type: 3V 1/2AA Lithium

**Physical and Environment**

Construction: Powder coated fabricated steel  
 Physical dimensions: 260 x 110 x 85mm  
 Weight: 2.2kg (4kg shipping)  
 Environment Temperature range: -45°C to 70°C  
 Humidity: 85%, non-condensing

**Accessories Included**

Line adaptor: 110/240Vac, 500mA  
 Comms Cable: for PC, with 9 to 25 pin adaptor  
 Software: Software Suite CD which includes DeLogger4, DeTransfer, DePlot applications  
 Manuals: "Getting Started with dataTaker"  
 "User's Manual"

**Optional Accessories**

**Channel Expansion Module (CEMS3)**

Multiplexer: relay  
 Number: 4 per GeoLogger  
 Channel number:  
 10 two wire  
 30 two wire shared terminals  
 20 digital inputs  
 10 digital outputs, 5 with relay contacts

**Portable Carrying Case (PE500)**

Capacity: 1 DT500 range unit + 1 x CEMS3  
 (Requires AS1072)

Environmental protection: IP66

**SRAM PC Card (MC1024P, MC4096P)**

Capacity: 1MByte, approximately 340,000 data points  
 4MByte, approximately 1,390,000 data points

**DeLogger™ 4 Pro**

Graphical programming and supervision software. Supports a large network of GeoLoggers connected via modem. Features include comprehensive plotting, reporting, mimics, database, web publishing and other powerful capabilities.

**Warranty**

The dataTaker DT515 and DT615 is covered by a 3 year warranty on workmanship and parts. For further information on the dataTaker range, or for useful downloads, visit the dataTaker web site at www.datataker.com or contact your nearest Datataker office or dealer.



Your local dealer

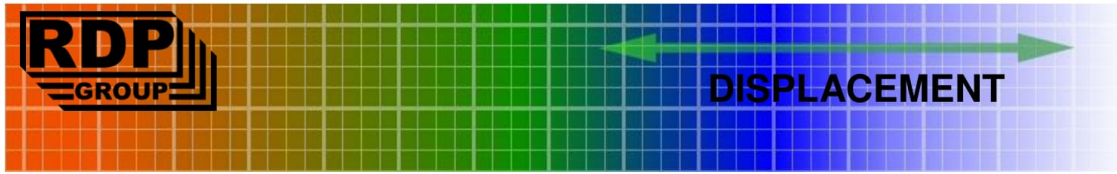


dataTaker, DeLogger are either registered trademarks or trademarks of Datataker Pty Ltd.

15-0004-82



## **ANEXO III – FICHA TÉCNICA DOS LVDTs INSTALADOS**



### LDC Series DC to DC LVDT Displacement Transducer

- Stainless steel
- High accuracy
- High cycle life
- Low supply voltage
- Input/output isolation
- High resolution
- Voltage output



These transducers are for displacement / position measurement. They make an accurate position measurement of the movement of the armature (the sliding part) relative to the body of the displacement transducer.

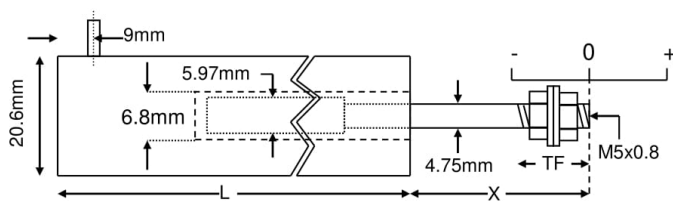
This transducer uses the Linear Variable Differential Transformer (LVDT) principle which means that it is probably the most robust and reliable position sensor type available. The strength of the LVDT sensor's principle is that there is no electrical contact across the transducer position sensing element which for the user of the sensor means clean data, infinite resolution and a very long life.

Our DC to DC LVDT transducer has all of the benefits of the LVDT sensor principle with the added convenience of built-in LVDT electronics enabling a dc supply and dc output.

This series of displacement transducer is available as either an unguided, captive or spring return version.

### Unguided version.

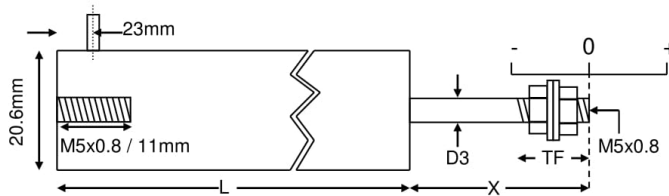
On our unguided LVDTs the armature assembly is a separate component, to make a measurement the user must guide the armature inside the body without touching the sides. Unguided position measurement transducers are appropriate where external guidance is available and give truly non-contact operation



Type	Range	Linearity error (% F.S.)	L	X	Total weight	Armature weight	TF	Inward over-travel
LDC500	±12.5mm	<±0.5/±0.25/±0.1	175mm	43mm	213g	17g	15mm	16mm
LDC1000	±25mm	<±0.5/±0.25/±0.1	203mm	69mm	270g	23g	15mm	22mm
LDC2000	±50mm	<±0.5/±0.25/±0.1	317mm	81mm	369g	37g	15mm	16mm
LDC3000	±75mm	<±0.5/±0.25/±0.1	430mm	119mm	497g	55g	15mm	29mm
LDC4000	±100mm	<±0.5/±0.25/±0.1	475mm	132mm	625g	71g	15mm	16mm
LDC6000	±150mm	<±0.5/±0.25	666mm	183mm	852g	100g	15mm	16mm
LDC8000	±200mm	<±0.5/±0.25	856mm	259mm	1.3kg	140g	29mm	27mm

## Captive guided version.

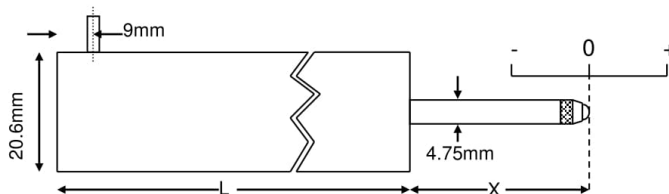
Our captive guided displacement transducer has bearings to guide the armature inside the measurement sensor. Captive LVDTs are for position measurement applications where guidance may be poor and end bearings may be required.



Type	Range	Linearity error (% F.S.)	L	X	D3	Total weight	TF	Inward over-travel	Outward over-travel
LDC500C	±12.5mm	<±0.5/±0.25/±0.1	194mm	38mm	4.75mm	340g	15mm	10mm	12mm
LDC1000C	±25mm	<±0.5/±0.25/±0.1	222mm	63mm	4.75mm	398g	15mm	13mm	10mm
LDC2000C	±50mm	<±0.5/±0.25/±0.1	336mm	76mm	4.75mm	511g	15mm	10mm	14mm
LDC3000C	±75mm	<±0.5/±0.25/±0.1	448mm	114mm	4.75mm	625g	15mm	24mm	15mm
LDC4000C	±100mm	<±0.5/±0.25/±0.1	494mm	127mm	4.75mm	767g	15mm	8mm	14mm
LDC6000C	±150mm	<±0.5/±0.25	684mm	178mm	4.75mm	1.0kg	15mm	12mm	17mm
LDC8000C	±200mm	<±0.5/±0.25	875mm	254mm	4.75mm	1.4kg	32mm	22mm	25mm
LDC10000C	±250mm	<±0.5/±0.25	1067mm	305mm	4.75mm	1.7kg	27mm	34mm	35mm
LDC15000C	±375mm	<±0.5	1473mm	406mm	4.75mm	2.2kg	19mm	13mm	13mm
LDC18500C	±470mm	<±0.5	1740mm	508mm	6.00mm	2.6kg	27mm	5mm	33mm

## Spring return version.

Our spring displacement transducer has bearings to guide the armature inside the measurement sensor and a spring which pushes the armature to the fully out position. Spring return LVDTs are appropriate where it is not possible to connect the transducer armature to the moving component being measured.



Type	Range	Linearity error (% F.S.)	L	X	Total weight	Spring force at X	Spring rate	Inward over-travel	Outward over-travel
LDC500A	±12.5mm	<±0.5/±0.25/±0.1	182mm	38mm	227g	1.3N	0.2N/cm	1mm	13mm
LDC1000A	±25mm	<±0.5/±0.25/±0.1	210mm	63mm	284g	2.0N	0.3N/cm	3mm	10mm
LDC2000A	±50mm	<±0.5/±0.25/±0.1	324mm	75mm	398g	1.8N	0.2N/cm	8mm	14mm
LDC3000A	±75mm	<±0.5/±0.25/±0.1	436mm	114mm	511g	6.0N	0.4N/cm	15mm	15mm

ANEXO III – FICHA TÉCNICA DOS LVDTs INSTALADOS

Specification	
Excitation/supply (acceptable)	5V to 18V dc, 60mA typical
Output	±2.2V
Output load	2kOhms (minimum)
Output ripple	30mV (peak-to-peak)
Electrical output bandwidth	200Hz (flat)
Output impedance	2 Ohms
Temperature coefficient (zero)	±0.01% F.S. /°C (typical)
Temperature coefficient (span)	±0.03% F.S. /°C (typical)
Operating temperature range	-40°C to 70°C
Electrical termination	2m (integral cable) Longer available to order.

All dimensions and specifications are nominal.

Due to our policy of on-going development, specifications may change without notice. Any modification may affect some or all of the specifications for our equipment.

UK Head Office  
 RDP Electronics Ltd  
 Grove Street, Heath Town  
 Wolverhampton, West Midlands, WV10 0PY  
 United Kingdom  
 Tel: +44 1902 457512  
 Fax: +44 1902 452000  
 Email: sales@rdpe.com  
 URL: www.rdpe.com  
 Registered in England No. 1688591  
 20141006