



UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

Daniely Lettieri e Paula

AVALIAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE VIBRAÇÕES  
INDUZIDAS POR TRÁFEGO - ESTUDO NUMÉRICO 2D

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma  
Construção Sustentável, orientada pelo Professor Doutor Luís Manuel  
Cortesão Godinho e pelo Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado  
Mendes e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Março de 2020

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
Departamento de Engenharia Civil

Daniely Lettieri e Paula

# AVALIAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS POR TRÁFEGO - ESTUDO NUMÉRICO 2D

## ASSESSMENT OF TRAFFIC-INDUCED VIBRATION PROPAGATION — 2D NUMERICAL STUDY

Dissertação de Mestrado em Eficiência Acústica e Energética para uma Construção Sustentável,  
orientada pelo Professor Doutor Luís Manuel Cortesão Godinho e pelo Professor Doutor Paulo Jorge Rodrigues Amado Mendes.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC  
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Março de 2020



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus familiares pelo apoio incondicional e principalmente aos meus pais que tornaram o sonho de realizar um mestrado possível.

Ao Professor Doutor Luis Godinho e ao Professor Doutor Paulo Mendes, orientadores desta dissertação, por todas as explicações, partilha do conhecimento e apoio de dados desde o começo deste trabalho.

A todos os meus amigos e pessoas que me ajudaram, por terem me apoiado, incentivado mesmo nos momentos em que eu não acreditava e por terem me trazido momentos de diversão.

## RESUMO

Estudos atuais comprovam que o nível de incomodidade aumenta relativamente ao aumento do tráfego aéreo, seguido pelo rodoviário e, por fim, o ferroviário. Um fator causador de problemas pela vibração do transporte, na superfície ou subterrâneo, é a transmissão das ondas no solo que podem chegar as estruturas próximas e serem re-radiada para as habitações. A transmissão da vibração por meio do solo é diretamente relacionada as propriedades do solo. Em terreno macio, a faixa de frequência de vibração é menor e, em geral, as medidas de mitigação na pista são menos eficazes. Em terrenos rígidos, as frequências são mais altas, sendo o ruído transmitido pelo solo mais relevante do que a vibração e as medidas de mitigação diretamente na pista podem ser mais eficazes.

Para a realização deste trabalho, adotou-se um método de elementos finitos em 2D no domínio do tempo para a transmissão da onda combinado com um multidimensional e dinâmico sistema de amortecimento. Esse método permitiu a análise do campo de ondas geradas devido a excitação de uma carga pontual vertical. Sendo assim, realizou-se a simulação de diversos modelos para exemplificação de diferentes comportamentos de ondas. Os modelos apresentavam diferentes características, como diferente solo, estrutura de túnel, local da carga e presença de métodos de mitigação. Os conjuntos de cenários foram divididos em três principais conjuntos de estudos: comportamento para solos homogêneos; comportamento para um sistema de solos sobre estrato rochoso; e o comportamento para uma estrutura de túnel inserida em um solo homogêneo com a presença de métodos de mitigação da vibração. Os métodos adotados foram da trincheira vazia e da parede enterrada em betão.

Concluiu-se que os resultados obtidos possibilitaram a comparação entre diversos cenários distintos. O primeiro conjunto de cenários para o solo homogêneo permitiu a definição da camada de amortecimento, que foi utilizada para todos os outros modelos, e a visualização clara do pulso. Ao passo que os modelos para solos heterogêneos demonstraram quanto menor a espessura da camada superior, maior a quantidade de reflexões presentes. Por fim, os cenários com uma estrutura de túnel para solo homogêneo e com métodos de mitigação demonstraram que a trincheira vazia é mais eficiente que a parede enterrada.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto PTDC/ECM-COM/1364/2014 – POCI-01-0145-FEDER-016783 (METASHIELD) - financiado por fundos FEDER através do COMPETE2020 - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.

**Palavras-chave:** Vibração, Solo, túnel, método elementos finitos.

## ABSTRACT

Current studies show that the level of people's discomfort increases in relation to the increase in air traffic, followed by road's traffic and, finally, rail's traffic. A factor that causes problems due to the vibration of transport, on the surface or underground, is the transmission of waves on the ground that can reach nearby structures and be re-radiated to rooms. The transmission of vibration through the soil is directly related to the properties of the soil. In soft terrain, the vibration frequency range is smaller and, in general, the mitigation measures on the track are less effective. In hard terrain, the frequencies are higher, the noise transmitted by the ground is more relevant than vibration and mitigation measures directly on the track may be more effective.

In order to carry out this work, a 2D finite element method in the time domain was adopted for wave transmission combined with a multidimensional and dynamic damping system. This method allowed the analysis of the wave field generated due to the excitation of a vertical point load. Thus, several models were simulated to exemplify different wave propagations. The models had different characteristics, such as different soils, presence of a tunnel structure, different load locations and presence of mitigation methods. The established scenarios were divided into three main sets of studies: behaviour of waves travelling in homogeneous soils; behaviour for a soil system on a rock layer; and the behaviour for a tunnel structure inserted in a homogeneous soil with the presence of vibration mitigation methods. The methods adopted were the empty trench and the buried wall barrier in concrete.

It was concluded that the results obtained made it possible to compare different scenarios. The first set of scenarios for homogeneous soil allowed the definition of the damping layer, which was used for all other models, and the clear visualization of the pulse. Whereas models for heterogeneous soils demonstrated the smaller the thickness of the upper layer, the greater the amount of reflections present. And the scenarios with a tunnel structure for homogeneous soil and with mitigation methods demonstrated that the empty trench is more efficient than the buried wall barrier.

This work was supported by Project PTDC/ECM-COM/1364/2014 – POCI-01-0145-FEDER-016783 (METASHIELD) - funded by FEDER funds through COMPETE2020 - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) and by national funds through FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P.

**Key words:** Vibration, Soil, tunnel, finite element method.

---

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vii
ÍNDICE DE QUADROS .....	xii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ENQUADRAMENTO GERAL E MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS .....	3
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	4
2 ESTADO DA ARTE .....	5
2.1 VIBRAÇÕES.....	5
2.2 VIBRAÇÕES NO SOLO .....	7
2.3 VIBRAÇÕES INDUZIDAS PELOS MEIOS DE TRANSPORTE .....	10
2.4 VIBRAÇÕES NA ESTRUTURA .....	14
2.5 MÉTODOS NUMÉRICOS ATUAIS PARA PREVISÃO DE VIBRAÇÃO .....	14
2.6 MÉTODOS DE MITIGAÇÃO .....	17
3 METODOLOGIA.....	19
3.1 MODELO NUMÉRICO.....	19
3.2 MÉTODOS DE MITIGAÇÃO ADOTADOS .....	22
3.3 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS ADOTADOS.....	23
3.4 DETERMINAÇÃO DA CAMADA DE AMORTECIMENTO .....	26
4 EXEMPLOS DE APLICAÇÕES .....	30
4.1 COMPORTAMENTO DO SOLO HOMOGÉNEO COM UMA CARGA PONTUAL NA SUPERFÍCIE ....	30
4.1.1 Solo homogéneo de areia compacta (AC_6) .....	30
4.1.2 Solo homogéneo de argila dura (AD_3).....	32
4.1.3 Solo homogéneo de rocha (Ro_4).....	33
4.1.4 Solo homogéneo de argila mole (AM_5).....	34
4.1.5 Solo homogéneo de areia fofa (AF_5) .....	36
4.2 COMPORTAMENTO DE UM SISTEMA DE SOLOS SOBRE ESTRATO ROCHOSO .....	38
4.2.1 Argila dura sobre estrato rochoso .....	40
4.2.1.1 Argila dura com 40 m de profundidade (AD_Ro_10) .....	40
4.2.1.2 Argila dura com 25 m de profundidade (AD_Ro_25) .....	42
4.2.1.3 Argila dura com 10 m de profundidade (AD_Ro_40) .....	45
4.2.2 Areia compacta sobre estrato rochoso.....	47

4.2.2.1 Areia compacta com 40 m de profundidade (AC_Ro_10).....	47
4.2.2.2 Areia compacta com 25 m de profundidade (AC_Ro_25).....	49
4.2.2.3 Areia compacta com 10 m de profundidade (AC_Ro_40).....	51
<b>4.3 COMPORTAMENTO DE UMA ESTRUTURA DE TÚNEL INSERIDA EM UM SOLO .....</b>	<b>53</b>
<b>4.3.1 Comportamento da estrutura do túnel inserida em um solo de areia compacta .....</b>	<b>57</b>
4.3.1.1 Solo homogéneo de areia compacta sem túnel (AC_sT) .....	57
4.3.1.2 Solo homogéneo de areia compacta com o furo do túnel (AC_T_AC).....	58
4.3.1.3 Solo homogéneo de areia compacta com túnel de anel em betão (AC_T_B).....	60
4.3.1.4 Níveis de vibrações máximos .....	62
4.3.1.5 Integral dos níveis de vibrações .....	64
<b>4.3.2 Comportamento da trincheira vazia em um solo de areia compacta.....</b>	<b>65</b>
4.3.2.1 Solo homogéneo de areia compacta com trincheira vazia de 3 m (AC_T_B_TrV_3).....	65
4.3.2.2 Solo homogéneo de areia compacta com trincheira vazia de 5 m (AC_T_B_TrV_5).....	68
4.3.2.3 Níveis de vibrações máximos .....	69
4.3.2.4 Integral dos níveis de vibrações .....	71
<b>4.3.3 Comportamento da parede enterrada em um solo de areia compacta.....</b>	<b>72</b>
4.3.3.1 Solo homogéneo de areia compacta com parede enterrada de 5 m (AC_T_B_PE_5).....	72
4.3.3.2 Níveis de vibrações máximos .....	74
4.3.3.3 Integral dos níveis de vibrações.....	76
<b>4.3.4 Comportamento da estrutura do túnel inserida em um solo de argila dura .....</b>	<b>77</b>
4.3.4.1 Solo homogéneo de argila dura com túnel de anel em betão (AD_T_B) .....	77
4.3.4.2 Solo homogéneo de argila dura com trincheira vazia de 5 m (AD_T_B_TrV_5) .....	79
4.3.4.3 Solo homogéneo de argila dura com parede enterrada em betão de 5 m (AD_T_B_PE_5).....	81
4.3.4.4 Níveis de vibrações máximos .....	83
4.3.4.5 Integral dos níveis de vibrações.....	85
<b>4.3.5 Comportamento da carga na superfície acima de uma placa em betão para solo de areia compacta .....</b>	<b>86</b>
4.3.5.1 Solo homogéneo de areia compacta com carga na superfície (AC_Sup_B) .....	86
4.3.5.2 Solo homogéneo de areia compacta com carga na superfície com trincheira vazia de 5 m (AC_Sup_B_TrV_5) .....	88
4.3.5.3 Solo homogéneo de areia compacta com carga na superfície com parede enterrada de 5 m (AC_Sup_B_PE_5).....	89
4.3.5.4 Níveis de vibrações máximos .....	91
4.3.5.5 Integral dos níveis de vibrações.....	93
<b>4.3.6 Comportamento da estrutura do túnel menos profundo para solo de areia compacta .....</b>	<b>94</b>
4.3.6.1 Solo homogéneo de areia compacta com túnel menos profundo (AC_T2_B) .....	94
4.3.6.2 Solo homogéneo de areia compacta com túnel menos profundo com trincheira vazia de 5 m (AC_T2_B_TrV_5).....	96
4.3.6.3 Solo homogéneo de areia compacta com túnel menos profundo com parede enterrada de 5 m (AC_T2_B_PE_5) .....	98
4.3.6.4 Níveis de vibrações máximos .....	100
4.3.6.5 Integral dos níveis de vibrações.....	101
<b>4.3.7 Comparação dos métodos de mitigação para diferentes locais de carga em areia compacta.....</b>	<b>103</b>
4.3.7.1 Níveis de vibrações máximos para modelos com trincheira vazia de 5 m .....	103
4.3.7.2 Integral dos níveis de vibrações para modelos com trincheira vazia de 5 m.....	104
4.3.7.3 Níveis de vibrações máximos para modelos com parede enterrada de 5 m.....	106
4.3.7.4 Integral dos níveis de vibrações para modelos com parede enterrada de 5 m .....	107

---

5 CONCLUSÃO.....	109
6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	113
ANEXO .....	A - 1



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 -Propagação de vibrações induzidas por tráfego ferroviário. Retirado de [3].	2
Figura 2- Fontes típicas de vibração com sua força típica. Retirado de [6].	6
Figura 3 - Ondas P. Retirado de [10].	8
Figura 4 - Ondas S. Retirado de [10].	8
Figura 5- Ondas Rayleigh. Retirado de [10].	9
Figura 6 - Ondas Love. Retirado de [10].	9
Figura 7 – (continuação) Os diferentes mecanismos de geração e percursos de propagação de ruído aéreo (não aplicável para a linha subterrânea), vibração em terra e ruído de origem. Retirado de [6].	13
Figura 8 – Discretização de um modelo em 0,25m. Sendo (a) a vista do modelo completo e (b) a ampliação dos elementos triangulares.	20
Figura 9 – Modelo com camada de amortecimento e desenvolvimento do amortecimento.	21
Figura 10 - Pulso de Ricker para diferentes frequências	22
Figura 11- Esquema de um modelo com parede enterrada	23
Figura 12- Esquema de um modelo com trincheira vazia	23
Figura 13 - Onda refletidas no tempo para AC_1	29
Figura 14 - Onda refletidas no tempo para AC_6	29
Figura 15 – Deformações para AC_1 e AC_6 em x.	29
Figura 16 – Representação do modelo AC_6, com cotas em metros	30
Figura 17 – Deslocamentos calculados para o modelo AC_6.	31
Figura 18 – Representação do modelo AD_3, com cotas em metros.	32
Figura 19 – Deslocamentos calculados para o modelo AD_3.	32
Figura 20 – Representação do modelo Ro_4, com cotas em metros.	33
Figura 21 – Deslocamentos calculados para o modelo Ro_4.	34
Figura 22 – Representação dos modelos AM_5, com cotas em metros	35
Figura 23 – Deslocamentos calculados para o modelo AM_5	35
Figura 24 – Representação dos modelos AF_5, com cotas em metros	36
Figura 25 – Deslocamentos calculados para o modelo AF_5	37
Figura 26- Representação do modelo AD_Ro_10 com cotas em metros.	40
Figura 27 - Propagação da onda para solo heterogéneo de argila dura e rocha com 10 m de profundidade, sendo: (a)=128,9 ms, (b)=147,4 ms, (c)=184,2 ms, (d)=221,0 ms, (e)=239,5 ms, (f)= 294,7 ms, (g)=331,6 ms, (h)=386,8 ms e (i)=442,1 ms.	41
Figura 28 -Deslocamentos para o solo heterogéneo de argila dura e rocha com 10 m de profundidade.	42

Figura 29- Representação do modelo AD_Ro_25 com cotas em metros.....	43
Figura 30- (continuação) Propagação da onda para solo heterogéneo de argila dura sobre rocha com 25 m de profundidade, sendo: (a)=92,1 ms, (b)=128,9 ms , (c)=165,8 ms, (d)=202,6 ms, (e)=239,5 ms, (f)= 276,3 ms, (g)=294,7 ms, (h)=350,0 ms e (i)=405,2 ms.....	44
Figura 31 -Deslocamentos para o solo heterogéneo de argila dura e rocha com 25 m de profundidade.....	44
Figura 32- Representação do modelo AD_Ro_40 com cotas em metros.....	45
Figura 33 – (continuação) Propagação da onda para solo heterogéneo de argila dura e rocha com 10 m de profundidade, sendo: (a)=55,3 ms, (b)=73,7 ms, (c)=92,1 ms, (d)=110,5 ms, (e)=147,4 ms e (f)= 202,6 ms .....	46
Figura 34 -Deslocamentos para o solo heterogéneo de argila dura e rocha com 40 m de profundidade.....	46
Figura 35- Representação do modelo AC_Ro_10 com cotas em metros .....	47
Figura 36 - Propagação da onda para solo heterogéneo de areia compacta e rocha com 40 m de profundidade, sendo: (a)=73,7 ms, (b)=92,1 ms, (c)=110,5 ms, (d)=128,9 ms, (e)=165,8 ms e (f)= 202,6 ms.....	48
Figura 37 -Deslocamentos para o solo heterogéneo de areia compacta e rocha com 40 m de profundidade.....	49
Figura 38-Representação do modelo AC_Ro_25 com cotas em metros. ....	50
Figura 39 - Propagação da onda para solo heterogéneo de areia compacta e rocha com 25 m de profundidade, sendo: (a)=55,3 ms, (b)=73,7 ms, (c)=92,1 ms, (d)=110,5 ms, (e)=128,9 ms e (f)= 165,8 ms.....	50
Figura 40 -Deslocamentos para o solo heterogéneo de areia compacta e rocha com 25 m de profundidade.....	51
Figura 41-Representação do modelo AC_Ro_40 com cotas em metros.....	52
Figura 42 - Propagação da onda para solo heterogéneo de areia compacta e rocha com 10 m de profundidade, sendo: (a)=36,8 ms, (b)=55,3 ms, (c)=73,7 ms, (d)=92,1 ms, (e)=110,5 ms e (f)= 128,9 ms .....	52
Figura 43 -Deslocamentos para o solo heterogéneo de areia compacta e rocha com 10 m de profundidade.....	53
Figura 44- Representação do modelo AC_sT, com cotas em metros.....	57
Figura 45 – Deslocamentos calculados para AC_sT.....	58
Figura 46- Propagação da onda para solo homogéneo de areia compacta sem estrutura do túnel, sendo: (a)=62,3 ms, (b)=112,1 ms e (c)=149,4 ms.....	58
Figura 47 - Representação do modelo AC_T_AC com cotas em metros.....	59
Figura 48– Deslocamentos calculados para AC_T_AC.....	59

Figura 49- Propagação da onda para solo homogêneo de areia compacta com o furo do túnel, sendo: (a)=38,1 ms, (b)=63,4 ms, (c)=88,8 ms, (d)=114,2 ms, (e)=139,5 ms e (f)= 190,3 ms.....	60
Figura 50- Representação do modelo AC_T_B, com cotas em metros.....	61
Figura 51– Deslocamentos calculados para AC_T_B.....	61
Figura 52- Propagação da onda para solo homogêneo de areia compacta com estrutura do túnel e anel em betão, sendo: (a)=27,4 ms, (b)= 35,6 ms , (c)= 46,5 ms, (d)=60,2 ms, (e)=79,3 ms, (f)=101,2 ms, (g)=117,7 ms, (h)=123,1 ms e (i)=153,2 ms.....	62
Figura 53 - Níveis de deslocamento máximo para a influência do túnel em x.....	63
Figura 54 - Níveis de deslocamento máximo para a influência do túnel em y.....	63
Figura 55 – Integral dos níveis de vibrações para a influência do túnel em x.....	64
Figura 56 – Integral dos níveis de vibrações para a influência do túnel em y.....	65
Figura 57 - Representação do modelo AC_T_B_TrV_3 com cotas em metros.....	66
Figura 58– Deslocamentos calculados para AC_T_B_TrV_3 .....	66
Figura 59 - Propagação da onda para solo homogêneo de areia compacta com estrutura do túnel com uma trincheira vazia de 3 m, sendo: (a)=32,8 ms, (b)=68,4 ms, (c)=79,3 ms, (d)=87,6 ms, (e)=114,9 ms, (f)=117,6 ms, (g)=136,8 ms, (h)=139,5 ms e (i)=158,7 ms.....	67
Figura 60- Representação do modelo AC_T_B_TrV_5 com cotas em metros.....	68
Figura 61– Deslocamentos calculados para AC_T_B_TrV_5 .....	68
Figura 62- Propagação da onda para solo homogêneo de areia compacta com estrutura do túnel com uma trincheira vazia de 5 m, sendo: (a)=73,9 ms, (b)=82,1 ms, (c)=98,5 ms, (d)=117,7 ms, (e)=134,1 ms e (f)=161,4 ms.....	69
Figura 63 - Níveis de deslocamento máximo para a influência de uma trincheira vazia em x.....	70
Figura 64 - Níveis de deslocamento máximo para a influência de uma trincheira vazia em y.....	70
Figura 65 – Integral dos níveis de vibrações para a influência de uma trincheira vazia em x.....	71
Figura 66 – Integral dos níveis de vibrações para a influência de uma trincheira vazia em y.....	71
Figura 67- Representação do modelo AC_T_B_PE_5 com cotas em metros.....	73
Figura 68– Deslocamentos calculados para AC_T_B_PE_5 .....	73
Figura 69- Propagação da onda para solo homogêneo de areia compacta com estrutura do túnel com uma parede enterrada de 5 m, sendo: (a)=68,4 ms, (b)=79,3 ms, (c)=84,8 ms, (d)=123,1 ms, (e)= 139,5 ms e (f)=153,2 ms.....	74
Figura 70 - Níveis de deslocamento máximo para a influência de diferentes métodos de mitigação em x.....	75

Figura 71 - Níveis de deslocamento máximo para a influência de diferentes métodos de mitigação em y .....	75
Figura 72 – Integral dos níveis de vibrações para a influência de diferentes métodos de mitigação em x. ....	76
Figura 73 – Integral dos níveis de vibrações para a influência de diferentes métodos de mitigação em y .....	76
Figura 74- Representação do modelo AD_T_B com cotas em metros .....	77
Figura 75– Deslocamentos calculados para AD_T_B.....	78
Figura 76- Propagação da onda para solo homogêneo de argila dura com estrutura do túnel, sendo: (a)= 27,4 ms, (b)= 38,3 ms, (c)=54,7 ms, (d)=71,1 ms, (e)=101,2 ms, (f)=125,9 ms, (g)=166,9 ms, (h)=213,4 ms e (i)= 276,3 ms .....	79
Figura 77- Representação do modelo AD_T_B_TrV_5 com cotas em metros.....	80
Figura 78– Deslocamentos calculados para AD_T_B_TrV_5 .....	80
Figura 79- Propagação da onda para solo homogêneo de argila dura com estrutura do túnel e trincheira vazia de 5 m, sendo: (a)=49,2 ms, (b)=101,2 ms, (c)=106,7 ms, (d)=117,6 ms, (e)=125,9 ms, (f)=150,5 ms, (g)=210,7 ms, (h)=243,5 ms e (i)=284,6 ms .....	81
Figura 80- Representação do modelo AD_T_B_PE_5 com cotas em metros.....	82
Figura 81– Deslocamentos calculados para AD_T_B_PE_5 .....	82
Figura 82- Propagação da onda para solo homogêneo de argila dura com estrutura do túnel e parede enterrada de 5 m, sendo: (a)=76,6 ms, (b)=106,7 ms, (c)=120,4 ms, (d)=169,6 ms, (e)=227,1 ms e (f)=284,6 ms. ....	83
Figura 83 - Níveis de deslocamento máximo para a argila dura em x .....	84
Figura 84 - Níveis de deslocamento máximo para a argila dura em y .....	84
Figura 85 – Integral dos níveis de vibrações para a argila dura em x .....	85
Figura 86 – Integral dos níveis de vibrações para a argila dura em y .....	85
Figura 87- Representação do modelo AC_Sup_B com cotas em metros.....	86
Figura 88– Deslocamentos calculados para AC_Sup_B .....	87
Figura 89- Propagação da onda para solo homogêneo de areia compacta com carga em uma placa de betão na superfície, sendo: (a)=29,6 ms, (b)=39,5 ms, (c)=54,3 ms, (d)=59,2 ms, (e)=74,0 ms e (f)=133,2 ms. ....	87
Figura 90- Representação do modelo AC_Sup_B_TrV_5 com cotas em metros .....	88
Figura 91– Deslocamentos calculados para AC_Sup_B_TrV_5 .....	88
Figura 92 - Propagação da onda para solo homogêneo de areia compacta com carga em uma placa de betão na superfície e trincheira vazia de 5 m, sendo: (a)=66,2 ms, (b)=81,4 ms, (c)=106,9 ms, (d)=117,0 ms, (e)=147,6 ms e (f)= 178,1 ms. ....	89
Figura 93- Representação do modelo AC_Sup_B_PE_5 com cotas em metros .....	90
Figura 94– Deslocamentos calculados para AC_Sup_B_PE_5 .....	90

Figura 95- Propagação da onda para solo homogéneo de argila dura com estrutura do túnel e parede enterrada de 5 m, sendo: (a)= 60,0 ms, (b)=92,8 ms, (c)=103,7 ms, (d)=120,1 ms, (e)=136,4 ms e (f)=158,3 ms. ....	91
Figura 96 - Níveis de deslocamento máximo para carga em uma placa de betão na superfície em x.....	92
Figura 97 - Níveis de deslocamento máximo para carga em uma placa de betão na superfície em y.....	92
Figura 98 – Integral dos níveis de vibrações para carga em uma placa de betão na superfície em x.....	93
Figura 99 – Integral dos níveis de vibrações para carga em uma placa de betão na superfície em y.....	93
Figura 100- Representação do modelo AC_T2_B com cotas em metros.....	95
Figura 101– Deslocamentos calculados para AC_T2_B.....	95
Figura 102- Propagação da onda para solo homogéneo de areia compacta com túnel de 10 m de profundidade, sendo: (a)= 34,7 ms, (b)=45,0 ms, (c)=69,3 ms, (d)=90,1 ms, (e)=107,4 ms e (f)=138,6 ms....	96
Figura 103- Representação do modelo AC_T2_B_TrV_5 com cotas em metros.....	97
Figura 104– Deslocamentos calculados para AC_T2_B_TrV_5 .....	97
Figura 105- Propagação da onda para solo homogéneo de areia compacta com túnel de 10 m de profundidade e trincheira vazia de 5 m, sendo: (a)= 58,9 ms, (b)=76,2 ms, (c)=107,4 ms, (d)=117,8 ms, (e)=124,7 ms e (f)=152,5 ms.....	98
Figura 106- Representação do modelo AC_T2_B_PE_5 com cotas em metros.....	99
Figura 107– Deslocamentos calculados para AC_T2_B_PE_5 .....	99
Figura 108- Propagação da onda para solo homogéneo de areia compacta com túnel de 10 m de profundidade e parede enterrada de 5 m, sendo: (a)=62,4 ms, (b)=72,8 ms, (c)=104,0 ms, (d)=114,3 ms, (e)=128,2 ms e (f)=152,5 ms.....	100
Figura 109 - Níveis de deslocamento máximo para carga em um túnel com 10 m de profundidade em x.....	101
Figura 110 – Níveis de deslocamento máximo para carga em um túnel com 10 m de profundidade em y.....	101
Figura 111 – Integral dos níveis de vibrações para carga em um túnel com 10 m de profundidade em x.....	102
Figura 112 – Integral dos níveis de vibrações para carga em um túnel com 10 m de profundidade em y.....	102
Figura 113 - Deslocamento máximo para diferentes locais de cargas com trincheira vazia em x.....	103
Figura 114 – Níveis de deslocamento máximo para diferentes locais de cargas com trincheira vazia em x.....	104

---

Figura 115 – Integral dos níveis de vibrações para diferentes locais de cargas com trincheira vazia em x.....	105
Figura 116 – Integral dos níveis de vibrações para diferentes locais de cargas com trincheira vazia em y.....	105
Figura 117 - Deslocamento máximo para diferentes locais de cargas com parede enterrada em x.....	106
Figura 118 - Deslocamento máximo para diferentes locais de cargas com parede enterrada em x.....	106
Figura 119 – Integral dos níveis de vibrações para diferentes locais de cargas com parede enterrada em x... ..	107
Figura 120 – Integral dos níveis de vibrações para diferentes locais de cargas com parede enterrada em y.. ..	108
Figura A 1 – Deslocamentos calculados, em x, para a areia compacta no tempo.....	A - 1
Figura A 2- Deslocamentos calculados, em y, para a areia compacta no tempo.....	A - 1
Figura A 3- Deslocamentos calculados, em x, para a argila dura no tempo .....	A - 2
Figura A 4- Deslocamentos calculados, em y, para a argila dura no tempo .....	A - 2
Figura A 5- Deslocamentos calculados, em x, para a rocha no tempo.....	A - 3
Figura A 6 - Deslocamentos calculados, em y, para a rocha no tempo.....	A - 3
Figura A 7 - Deslocamentos calculados, em x, para todos os solos no tempo.....	A - 4
Figura A 8- Deslocamentos calculados, em y, para todos os solos no tempo.....	A - 4
Figura A 9 - Deslocamentos calculados, em x, para solo heterogêneo de argila dura e rocha .....	A - 5
Figura A 10 - Deslocamentos calculados, em y, para solo heterogêneo de argila dura e rocha .....	A - 5
Figura A 11 - Deslocamentos calculados, em x, para solo heterogêneo de areia compacta e rocha .....	A - 6
Figura A 12 - Deslocamentos calculados, em y, para solo heterogêneo de areia compacta e rocha .....	A - 6

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1- Características de cada solo ou material .....	26
Quadro 2 - Largura da camada de amortecimento considerada para cada modelo .....	27
Quadro 3 – Identificação dos modelos para o solo heterogéneo de argila dura .....	39
Quadro 4 - Identificação dos modelos analisados com túnel .....	54

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento geral e motivação

Durante os últimos anos, a preocupação com as questões ambientais associadas a vibrações induzidas pelo tráfego subterrâneo e superficial ferroviário aumentaram substancialmente. Assim torna-se cada vez mais desejável dispor de um método de simulação e previsão das vibrações que serão geradas pelo meio de transporte ainda em fase de projeto mas que, também, possa ser utilizado quando este já esteja construído por meio de simulação para novas propostas de sistemas de mitigação [1].

De acordo com a APA (Agência Portuguesa do Ambiente), o ruído é uma das principais causas da degradação da qualidade de vida do meio urbano, sendo o transporte um dos principais responsáveis. Em vários estudos realizados, foi comprovado que o nível de incomodidade aumenta relativamente ao incremento do tráfego aéreo, seguido pelo rodoviário e, por fim, o ferroviário [2].

Pode-se controlar o ruído na fonte, na propagação e no recetor, lembrando que os níveis sonoros relacionados com o ruído ambiente raramente afetam o sistema auditivo. Logo, os principais sintomas relacionados com o alto nível de ruído são as perturbações psicológicas ou fisiológicas associadas ao stress, incomodidade e cansaço. O ruído interfere com as comunicações e provoca perturbações no sono, na capacidade de concentração e hipertensão arterial. Dessa forma, pode-se concluir que o ruído é um problema de saúde pública e o controlo do ruído é de grande importância [2].

A propagação do ruído pelo meio sólido é definida como vibração e a esta pode ser definida, de acordo com o dicionário, como a oscilação de uma partícula, a qual pode ser artificial ou natural, por exemplo, um terramoto causa uma vibração natural. A norma ISO 14837-1: 2005 ‘Mechanical vibration – Ground-borne noise and vibration arising from rail systems – Part 1: general guidance’ fornece um esquema de como é transmitido a vibração vinda do tráfego ferroviário para uma construção, este esquema pode ser visto na Figura 1 [3].



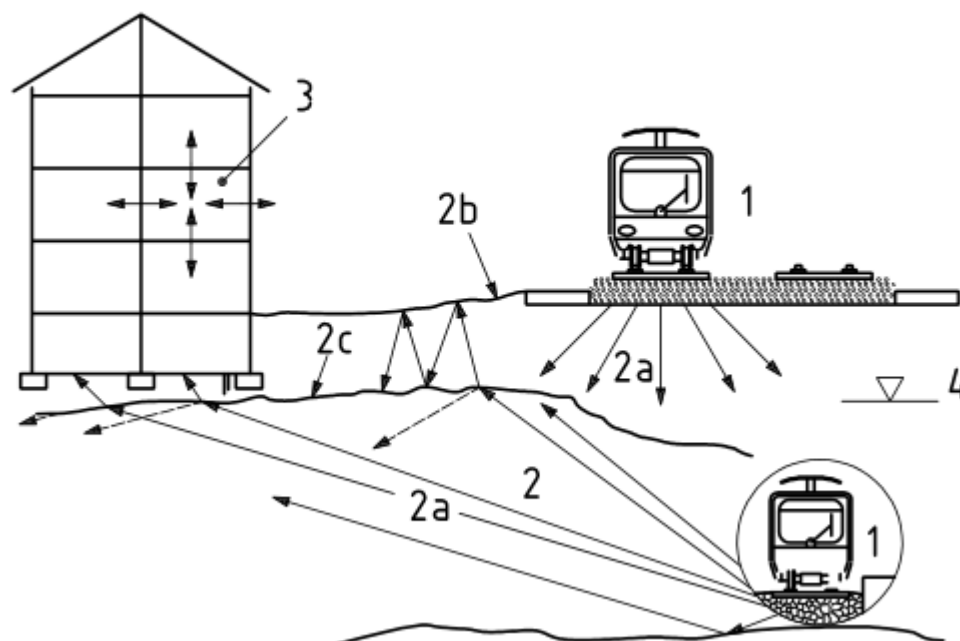


Figura 1 -Propagação de vibrações induzidas por tráfego ferroviário. Retirado de [3].

As definições das numerações são: 1- Fonte; 2- Propagação das ondas: a) Ondas de corpo (compressão e cisalhamento); b) Ondas superficiais (exemplo ondas Rayleigh); c) Ondas de interface (exemplo Stoneley); 3- Recetor (vibração, ruído re-radiado); 4- Lençol freático;

Os problemas causados pela vibração do transporte ferroviário podem ser associados a três fatores distintos, primeiramente, ao movimento do comboio sobre o carril ou o movimento do carro sobre a pista que gera vibração. Em segundo lugar, pela dispersão da energia no solo em forma de vibração. E, por último, o facto de a vibração alcançar construções perto da infraestrutura de transporte, o que produz ruídos e essas vibrações podem incomodar os habitantes e/ou impedir a utilização de certos dispositivos como equipamentos eletrônicos [1].

A vibração induzida pelo tráfego rodoviário e ferroviário depende das condições da via ou dos carris, do peso do veículo, da sua velocidade e do tipo do solo. No caso do tráfego rodoviário, os pavimentos irregulares, como os prismáticos (paralelepípedos) a base de rochas ígneas (granitos), são os que geram mais energia vibratória, sendo que a pavimentação asfáltica de boa qualidade é uma medida mitigadora eficiente segundo a BS 5228-2 [4]. No caso do tráfego ferroviário, a velocidade e carga transportada são os fatores que mais influenciam na vibração gerada [5].

A vibração induzida pelo meio de transporte também depende de diversos fatores, podendo destacar-se o tipo de fundação da construção e estrutura do edifício, a distância da construção

em relação à fonte, o solo no qual está inserido e, as características do meio de transporte, assuntos que serão explorados com mais detalhe neste trabalho.

A propagação da vibração por meio do solo é diretamente relacionada com as propriedades do solo que pode ou não excitar edifícios adjacentes, dependendo da proximidade do mesmo em relação à fonte. A variabilidade afeta particularmente a faixa de frequências relevantes da vibração resultante e a eficácia das medidas de mitigação. Em terrenos macios, a faixa de frequência de vibração é menor e, em geral, as medidas de mitigação na pista são menos eficazes e, em terrenos rígidos, as frequências são mais altas, conseqüentemente, o solo não transmite ruído apenas da vibração e as medidas de mitigação diretamente na pista podem ser mais eficazes [6].

Modelos numéricos de previsão da vibração propagada pelo solo representam uma importante ferramenta para entendimento da geração e propagação das ondas induzidas por transportes, como também para fornecer uma base para medições realizadas em campo e ajudar a prevenir futuros problemas [7].

Sendo assim, é necessário realizar simulações dos efeitos a vibração, para permitir definir uma solução mitigadora eficiente. Atualmente, existem vários modelos de cálculo da vibração no solo causada pelo transporte utilizando modelos numéricos, sendo neste trabalho adotado um modelo 2D com camada de amortecimento de elementos finitos com marcha no tempo.

A fim de solucionar o problema causado pelas vibrações induzidas pelo transporte, atualmente procura-se cada vez mais soluções eficazes para a mitigação, buscando eficiência e aceitação social. As estratégias mais comuns de aplicação para a mitigação das vibrações são as trincheiras, paredes enterradas e blocos de inércia, devendo explorar-se quais os melhores materiais e a melhor localização para garantir a melhor eficiência e maior atenuação [8].

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo realizar um conjunto de estudos numéricos relativos à propagação de vibrações em solos geradas por uma carga pontual vertical, que simula a passagem do meio de transporte. Pretende-se entender as diferenças de comportamento das ondas que são propagadas e quais as maiores influências para aumentar os deslocamentos no sistema, entre os cenários adotados como exemplos.

Aborda-se a análise da propagação da vibração no solo e complementarmente, com análise das respostas para a inclusão de dois métodos de mitigação, que são a parede enterrada e a trincheira

---

vazia. Complementarmente, neste trabalho, realiza-se a possibilidade de utilização do modelo numérico escolhido.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

Este trabalho começa apresentando um resumo da situação atual das causas e implicações das vibrações sentidas.

O capítulo 2 explica algumas noções importantes para entender os principais conceitos abordados neste trabalho. Primeiramente, definindo tecnicamente o que são vibrações. Depois, focando em como ocorre a propagação da vibração pelo solo, dando foco na que é induzida pelo meio de transporte. Seguindo, pela propagação que chega até as estruturas próximas de vias de tráfego e pela demonstração de alguns métodos de mitigação. E, por fim, apresenta quais são, atualmente, os métodos numéricos para a previsão da vibração induzida pelo meio de transporte.

No capítulo 3 é demonstrada a metodologia completa utilizada para este trabalho. Primeiramente, aborda-se qual o modelo numérico adotado e os parâmetros inseridos na sua programação. Depois, introduz os detalhes construtivos dos dois métodos de mitigação escolhidos. Seguindo para quais os cenários adotados que permitissem a maior compreensão sobre a propagação das ondas e com comparação da eficiência do método de mitigação. Por fim, demonstra-se como é definida a camada de amortecimento necessária para que os modelos reproduzam os conceitos de um meio infinito.

No capítulo 4 é apresentado o desenvolvimento de todos os estudos de caso propostos e são apresentadas as análises e discussão de resultados obtidos para cada cenário. São definidos diversos cenários para exemplificação da aplicação, sendo divididos em três principais conjuntos de estudos: comportamento para solos homogêneos; comportamento para um sistema de solos sobre estrato rochoso; e o comportamento para uma estrutura de túnel inserida em um solo homogêneo.

No capítulo 5 é apresentada a conclusão com as considerações finais tomadas a partir deste trabalho.

## 2 ESTADO DA ARTE

No Ponto que se segue são apresentados os conceitos mais relevantes para a compreensão do que é feito e da motivação para a realização deste trabalho. Explica-se, primeiramente, de forma mais técnica o que são vibrações. Depois, focando em como é desenvolvido a propagação da vibração pelo solo, dando foco na que é induzida pelo meio de transporte, chegando até as estruturas próximas de vias de tráfego. Depois, apresenta quais são, atualmente, os métodos numéricos para a previsão da vibração induzida pelo meio de transporte, indicando qual o método mais indicado para este trabalho e, por fim, apresenta brevemente alguns métodos de mitigação e definindo quais serão os adotados.

### 2.1 Vibrações

As pessoas estão expostas a muitos tipos de vibrações; alguns exemplos típicos são as vibrações do motor do carro enquanto dirigem, as vibração na mão quando utilizam um processador de alimentos na cozinha, a vibração no corpo inteiro quando perto de uma máquina de lavar e outro exemplo pode ser a vibração induzida por comboios que é sentida no corpo inteiro quando se está na plataforma a sua espera. Basicamente, qualquer tipo de máquina de rotação induz uma vibração, e esta vibração pode ser transmitida através de um meio até uma estrutura de um prédio e prosseguir para os quartos mais afastados da fonte [6].

A vibração pode ser percebida através da percepção de forma combinada de sensações acústicas (ruído) e sensações dinâmicas (a vibração em si). Muitas vezes, a vibração é aceite como óbvia e sem necessidade de preocupações, como ao dirigir um carro em uma pista irregular ou quando estamos dentro de um elevador em funcionamento; Algumas fontes têm características de vibração e ruídos bem característicos, por exemplo, terremotos acima de uma certa magnitude, cravação de estacas para trabalhos de construção, equipamento de ar condicionado montado em telhados ligeiros, máquinas de lavar a roupa em pisos ligeiros, tráfego intenso em rodovias ou ferrovias, vizinhos batendo portas, passos dos vizinhos de cima em pisos ligeiros e muitos outros que diariamente podemos perceber [6].

A partir dos exemplos listados acima pode-se notar que a vibração é gerada a partir de uma perturbação, num meio, que produz efeitos que se transmitem rapidamente ao restante do meio, para tentar restaurar o equilíbrio perdido devido a perturbação inicial. Este processo envolve a dissipação e irradiação de energia localizada onde se produziu a perturbação e são a base da propagação de ondas. De forma mais detalhada pode-se dizer que quando a partícula é deslocada da sua posição inicial, esta choca com a partícula próxima fazendo-a mover e recuando ela própria, por consequência essa partícula próxima colide com a seguinte e assim

sucessivamente, havendo uma propagação da perturbação através do meio por sucessivas oscilações das partículas, lembrando-se que nenhuma das partículas é transmitida ao longo da onda, apenas a energia de perturbação é transmitida [9].

As características do meio de propagação da onda como o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e massa volúmica influenciam no tempo necessário à propagação do movimento entre as partículas e a velocidade de propagação. Este trabalho foca-se na propagação da vibração induzida pelo transporte que se dá através do solo, um meio sólido, o qual é considerado um meio contínuo e onde é possível a ocorrência de dois tipos de ações distintas: no meio sólido podem-se transmitir tensões de tração e compressão, sendo o movimento das partículas na direção do movimento da onda; e podem transmitir-se, também, tensões de corte sendo o movimento das partículas transversal à direção da propagação. No caso dos fluidos, como o ar, apenas pressões são possíveis de serem transmitidas, pois o meio não admite tensões de corte [9].

O infrassom (frequência abaixo de 20 Hz) geralmente não pode ser ouvido, mas é frequentemente associado a estruturas vibratórias. O ruído de baixa frequência, em torno de 20Hz a 160Hz é uma questão de crescente preocupação e é por vezes mencionado nos casos em que o ruído transmitido pelo solo é identificado [6].

Na Figura 2 pode-se observar as diferentes fontes sonoras, a velocidade de vibração e qual a resposta das pessoas e das estruturas. Nota-se que, comumente, as ferrovias e as rodovias causam irritabilidade nas pessoas mas não geram problemas estruturais [6].

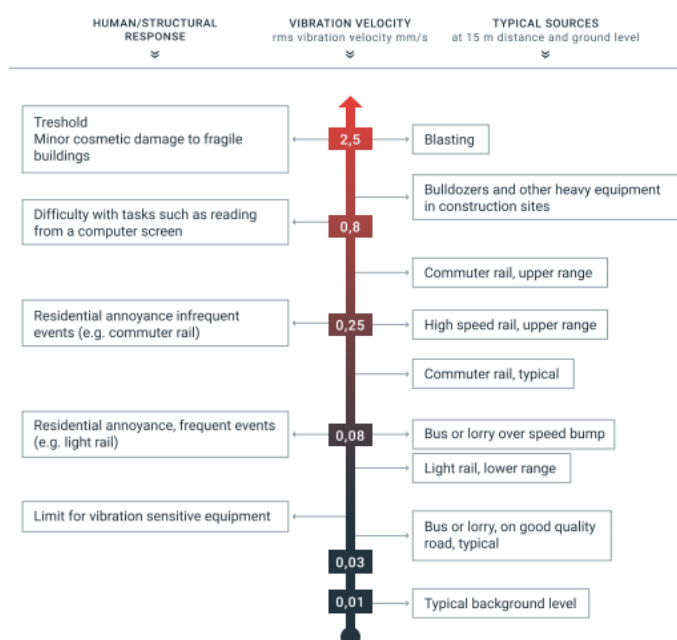


Figura 2- Fontes típicas de vibração com sua força típica. Retirado de [6].

## 2.2 Vibrações no solo

O tempo levado para que haja o movimento entre as partículas e a velocidade de propagação da perturbação dependem das características do meio, sendo as mais importantes o coeficiente de elasticidade (E), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e a massa volúmica ( $\rho$ ), parâmetros que serão brevemente explicados mais à frente neste trabalho. Nos fluidos, como ar e água, e nos sólidos, o meio é considerado contínuo e as suas propriedades são consideradas contínuas, resultantes de médias de quantidades microscópicas [9].

Se as fontes dinâmicas existissem em meio infinitos e homogêneos a irradiação da energia seria uniforme, resultando direções de propagações lineares. Porém, os meios de propagação são em grande maioria heterogêneos. Para exemplificar, pensemos no solo, que raramente será homogêneo pois existem usualmente distintas camadas de solos em contacto. Diferentemente do solo homogêneo, quando a onda elástica atinge a fronteira entre dois materiais sofre fenómenos de reflexão, propagação e difração, para um meio heterogêneo, onde existe a variação das propriedades elásticas dos meios, sendo uma parte da onda refletida, enquanto o resto é propagado com certa variação na direção de propagação [9].

Quando os impulsos atingem um corpo sólido, são gerados três tipos de ondas e considerando o meio de propagação como um meio infinito, existem dois tipos fundamentais de “body waves”:

➤ As ondas dilatacionais (também conhecida como ondas volumétricas, de compressão, longitudinais, irrotacionais ou ondas primárias (P)) que envolvem dilatação do volume com compressão como pode ser visto na Figura 3. A amplitude das ondas decresce com o inverso da distância à fonte, sendo as ondas P as mais rápidas (ex. a velocidade de propagação no granito é de cerca de 5.5km/s) [10]. Apenas se propagam ondas P nos meios fluidos, como é o caso do ar e a sua fórmula pode ser definida pela equação (1) [11];

$$V_p = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}} \quad (1)$$

onde: E é o módulo de elasticidade do meio;

$\nu$  é o coeficiente de Poisson;

$\rho$  é a massa volúmica do meio.

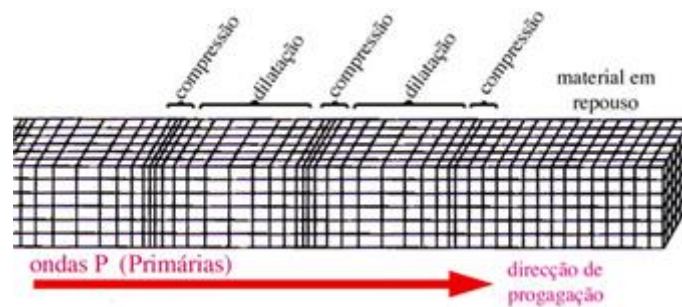


Figura 3 - Ondas P. Retirado de [10]

➤ As ondas distorcionais (também conhecidas como ondas transversais, rotacionais, de corte ou ondas secundárias (S)) envolvem variação de forma e não de volume e são perpendiculares à direção da onda como pode ser visto na Figura 4 [10] e com velocidade tipicamente de cerca de 60% da velocidade das ondas P porém apresenta energia superior, causando mais estragos que as ondas P [12]. A sua velocidade pode ser definida pela equação (2) [11];

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)}} \quad (2)$$

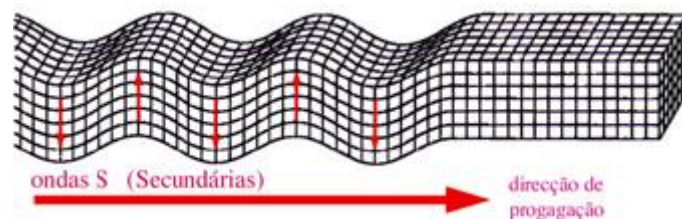


Figura 4 - Ondas S. Retirado de [10]

O local onde se juntam todos os pontos deslocados simultaneamente pelo pulso, chama-se frente de onda. A frente de onda é definida como aquela que todos os pontos se encontram no mesmo estado de vibração, para pequenas distâncias a frente de onda tem forma esférica e com o aumento da distância à fonte a frente de onda torna-se gradualmente mais plana, sendo possível afirmar que, para grandes distâncias, a frente de onda é uma onda plana [10]. O movimento das partículas para as ondas P é na direção da onda, radial e o movimento das partículas para as ondas S é normal a propagação, tangencial à frente da onda, tendo dois graus de liberdade, logo, é possível ter ondas S polarizadas horizontalmente, ondas SH (perpendiculares ao plano de propagação), ou ondas polarizadas verticalmente, ondas SV (no plano de propagação) [9].

Tanto as ondas compressivas quanto as de corte, têm na origem grande gama de frequências, porém, considera-se as mais preocupantes as ondas de baixa frequência até 50 Hz, pois as altas frequências são mais facilmente atenuadas pelo solo [10].

Para um meio homogêneo e isotrópico só existem ondas P e S. No entanto, quando o meio não é infinito em todas as dimensões, outros tipos de ondas podem ser geradas, como ondas de Rayleigh (ondas R), representado na Figura 5, que são ondas produzidas na superfície, conhecidas como ondas de superfície, as quais têm a amplitude diminuída exponencialmente com a profundidade e a velocidade de propagação é inferior à das ondas de corpo, podendo ser expressa pela equação (3) [9].

$$V_R = V_s \frac{0,87 + 1,12 \cdot \nu}{1 + \nu} = \frac{0,87 + 1,12 \cdot \nu}{1 + \nu} \cdot \sqrt{\frac{E}{2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)}} \quad (3)$$

onde:  $V_s$  = velocidade das ondas S.

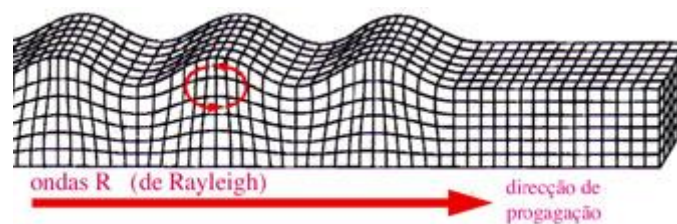


Figura 5- Ondas Rayleigh. Retirado de [10]

No caso dos movimentos transversais paralelos à superfície (ondas SH) podem surgir ondas de superfície, chamadas de “ondas Love”, demonstradas na Figura 6, que têm velocidades menores que as ondas R [9].

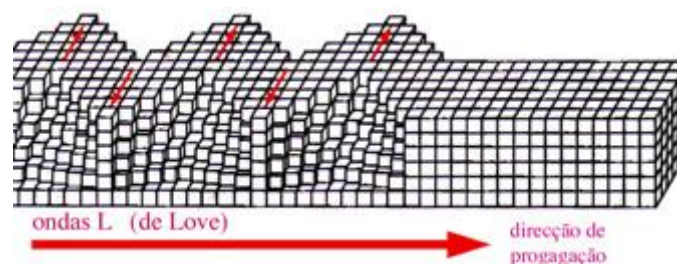


Figura 6 - Ondas Love. Retirado de [10]

Para compreender melhor o comportamento das ondas de vibrações deve-se entender que, de acordo com a teoria da elasticidade, aplicando-se forças externas a um corpo é possível mudar o tamanho e a forma de um sólido; essa relação é expressa em termos de conceitos de tensão e extensão. Para exemplificar melhor, considera-se um elemento cúbico infinitesimal de volume,



as tensões tangenciais e normais que atuam em cada uma das seis faces, permitem que o cubo esteja em equilíbrio [9].

A equação de movimento para um material elástico linear isotrópico pode ser expressa em relação ao deslocamento do material e está apresentada pela equação (4) [13]:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) - \mu \nabla \times (\nabla \times \mathbf{u}) \quad (4)$$

onde:  $\mathbf{u}$  é o deslocamento do material em relação ao estado de referência;

$\rho_0$  é a massa volúmica do material no estado de referência;

$\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}$  é a aceleração;

$\lambda$  e  $\mu$  são as constantes de Lamé;

$\nabla$  é o gradiente;

$\nabla \cdot$  é o divergente;

As constantes de Lamé estão relacionadas com o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) do material e estão demonstradas na equação (5).

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (5)$$

A partir da equação (4), pode-se escrever a relação das tensões com as extensões para o meio isotrópico pela equação (6) para as coordenadas x, y e z [9]:

$$\begin{aligned} \sigma_{ii} &= \lambda \Delta + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_{ii} \quad i = x, y, z \\ \sigma_{ij} &= \mu \cdot \varepsilon_{ij} \quad i, j = x, y, z, i \neq j \end{aligned} \quad (6)$$

Onde:  $\varepsilon$  é o vetor de extensão;

$\sigma$  é o vetor de tensão;

Após apresentar brevemente algumas equações para o cálculo da propagação das ondas, compreende-se que as soluções analíticas se tornam muito complexas para análise de um meio tridimensional e uma fonte, tornando-se necessário obter soluções numéricas, com recursos e métodos como o dos elementos finitos e dos elementos de fronteiras [9].

### 2.3 Vibrações induzidas pelos meios de transporte

A vibração da ferrovia é tipicamente observada como um tremor suave pelos habitantes ou um tremor na casa, geralmente do pavimento em que as pessoas estão paradas. A agitação da construção pode ser sentida com a mão, os pés ou mesmo o corpo inteiro, parecendo que a

construção está tremendo e além do tremor, muitas vezes um ruído fraco é ouvido, causado pela estrutura do edifício que irradia o ruído para os quartos. Este ruído re-radiado pela estrutura pode ser aumentado pelo barulho de portas soltas, cerâmica e objetos soltos em armários [6].

A vibração induzida pelo tráfego é uma perturbação de baixa frequência que pode ser transmitida através do ar ou chão. O ruído proveniente do tráfego é produzido pelo motor e exaustão do veículo e a vibração transmitida pelo solo é produzida pela interação entre as rodas e a superfície da estrada [14].

Há dois efeitos da vibração do tráfego que precisam ser considerados: os efeitos nos edifícios e a perturbação causada a ocupantes da propriedade. Extensa pesquisa foi realizada em um gama de edifícios de várias idades e tipos, e nenhuma evidência foi encontrada para apoiar a teoria de que a vibração do solo induzida pelo tráfego é uma fonte de danos significativos ao edifício. De acordo com a DMRB Noise and Vibration, o “Uso normal de edifícios como o fechamento de portas, andar sobre pisos de madeira suspensos e os aparelhos domésticos que operam podem gerar níveis de vibração semelhantes aos do tráfego” [15].

A velocidade de propagação da onda no solo é inversamente a proporcional à energia vibratória induzida nas edificações. Nos solos mais rígidos (como os argilosos coesivos ou rochosos) a propagação da energia vibratória ocorre em maiores velocidades, sendo que a tensão gerada nas fundações, e conseqüentemente a vibração induzida, são menores. O inverso ocorre nos solos menos rígidos como os arenosos. A variável utilizada para quantificação da vibração em uma superfície é a velocidade da partícula, estando relacionada com os principais danos estruturais [5].

Para ferrovias, a vibração é mais frequentemente gerada pelo contacto entre a roda do comboio e a linha férrea. A vibração, em seguida, viaja a partir do carril, através do solo e atinge a fundação do edifício, o qual transmite através da estrutura e permite que a vibração gerada seja sentida no chão, esta vibração é comumente chamada de vibração transmitida pelo solo e pode ser observada na Figura 7 (b) e (d). Geralmente (mas com algumas exceções) a amplitude da vibração do solo diminui à medida que se afasta da pista. No entanto, a amplitude da vibração pode aumentar ao subir no interior do edifício devido às ressonâncias da estrutura do edifício [6].

Na maioria das situações, exceto as mais extremas, a vibração causada pela passagem de comboio é muito fraca para causar danos estruturais nas construções [6], porém este pode causar desconforto aos habitantes e embora os danos estruturais em edifícios não sejam comumente relacionados ao trânsito, a ocorrência de algum dano estético não é tão incomum, o que também é inaceitável no caso de património histórico e construções importante [16].

A ISO 14837-1 [3] define ruídos ferroviários transmitidos pelo solo como “ruído gerado no interior de um edifício por vibração transmitida pela terra gerada a partir da passagem de um veículo sobre o carril”, podendo ser referido também como ruído re-radiado, ou ruído transmitido pela estrutura ou ainda ruído transmitido pelo material sólido, e exclui o ruído gerado pelo ar, este ruído encontra-se em uma gama de frequências de 20 a 250 Hz [6].

O ruído que se propaga pelo ar na passagem de um comboio pode ser visto na Figura 7 (a), mas neste trabalho, este tipo não é analisado.

O ruído transmitido pela estrutura ocorre como resultado da vibração na estrutura do edifício e também é tratado como ruído re-radiado. Observa-se como ruído audível, geralmente com um forte conteúdo de baixa frequência (portanto, por vezes, endereçado como ruído de baixa frequência). Mesmo para um ouvinte treinado, é difícil distinguir o ruído audível da estrutura da vibração sensível, já que os dois geralmente ocorrem em combinação. Como o ruído transmitido pelo solo, o ruído transmitido pela estrutura é encontrado entre 20 e 250 Hz [6]. O ruído radiado (re-radiado como ruído transmitido pelo solo ou ruído de estrutura) ocorre como resultado de vibração e é observado como ruído audível. Isso também é tratado como ruído transmitido pela estrutura e pode ser observado na Figura 7 (c) e (e) [6].

A combinação do ruído transmitido pela estrutura, ruído radiado e ruídos ferroviários transmitidos pelo solo, serão designados todos como ruído transmitido pelo solo devido a esses ruídos comumente acontecerem em combinação. Para melhor compreender, pode-se observar a Figura 7. que exemplifica a propagação de cada ruído e vibração definidos [6].

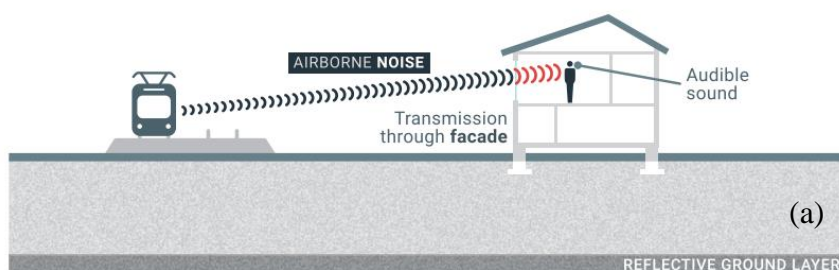


Figura 7 – Os diferentes mecanismos de geração e percursos de propagação de ruído aéreo (não aplicável para a linha subterrânea), vibração em terra e ruído de origem. Retirado de [6].

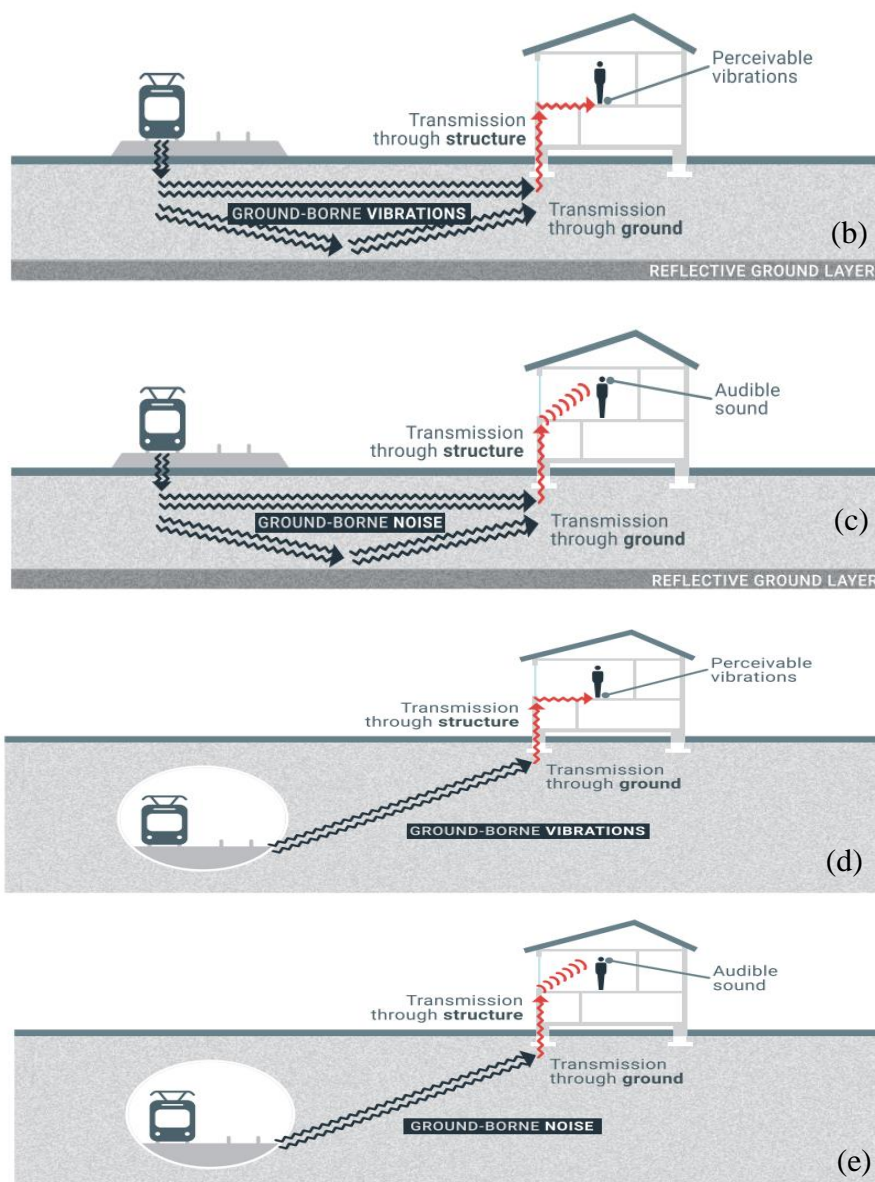


Figura 7 – (continuação) Os diferentes mecanismos de geração e percursos de propagação de ruído aéreo (não aplicável para a linha subterrânea), vibração em terra e ruído de origem.

Retirado de [6].

Em algumas situações, o ruído audível normal pode mascarar ruídos de baixa frequência, dificultando a sua deteção. No entanto, em combinação com a vibração transmitida no solo, o ruído de baixa frequência pode ser mais facilmente percebido. Particularmente para linhas de comboio subterrâneo, o ruído de baixa frequência pode ser uma indicação clara da passagem de um veículo ferroviário [6].

## 2.4 Vibrações na estrutura

Embora neste trabalho não se estude a propagação da vibração para as estruturas próximas, é necessário ressaltar as complicações que a vibração pode trazer. Para o dimensionamento da vibração sentida pelas construções perto de grandes rodovias ou de metro e aeroportos deve-se analisar alguns fatores associados à percepção da vibração que incluem a distância do recetor à fonte, velocidade, tipo de tráfego, qualidade da via, tuneis e/ou dos carris, tipo e preparação do solo, qual o modo de fundação que sustenta a construção e o tipo de construção [6].

As edificações que possuem estrutura em aço ou betão armado tendem a receber melhor os efeitos da vibração, desde que projetadas para tal. Em contrapartida, as construções antigas e patrimónios históricos, edificados com materiais menos resistentes, como a alvenaria de tijolos de barro, queimados em fornos ou não, e em algumas situações mal conservadas, taipa ou madeira, podem sofrer desde rachaduras menores até danos estruturais irreversíveis quando expostas a elevados níveis de vibração [5].

As fundações pesadas previnem a deformação devido à vibração induzida nas paredes sendo que as fissuras são usuais em edificações de estruturas leves. No caso de estrutura rígida e apoiada em um solo de baixo amortecimento, o deslocamento nas paredes da edificação é praticamente nulo devido à resposta de corpo rígido da edificação.

No caso de estruturas flexíveis apoiadas em solos rígidos, os deslocamentos nas fundações são desprezíveis, mas as paredes deformam, acompanhando a movimentação do solo, o que resulta em fissuras. Caso a frequência de ressonância da estrutura da edificação seja similar à frequência de propagação da onda vibratória haverá amplificação do deslocamento de solo/fundação, ocasionando um impacto indesejado segundo a BS 7385- 1 (British Standard). Outro efeito importante gerado pela vibração é o adensamento do solo, principalmente os arenosos, que podem gerar assentamentos diferenciais podendo haver o rompimento da estrutura [5].

## 2.5 Métodos numéricos atuais para previsão de vibração

Diversos tipos de modelos analíticos foram propostos durante a última década. Os avanços mais recentes dizem respeito à simulação de sistemas túnel-solo, bastante complexos devido ao caráter infinito do solo e à forte interação entre estruturas. Apesar disso, limitações quanto às geometrias admissíveis, ao assentamento do solo ou à presença de túneis rasos podem constituir restrições ao uso desses modelos em algumas situações práticas mais específicas, ressaltando a necessidade da criação de um modelo numérico [1].

Muitas pesquisas são feitas atualmente com diferentes abordagens numéricas para a formulação de um modelo que possa prever com maior nível de precisão uma situação real de propagação de vibrações no solo induzidas por transportes. Para tanto, têm sido desenvolvidos diferentes métodos para previsão, como exemplo podemos citar os métodos analíticos/semi-analíticos, método de elementos finitos (FEM), combinação dos métodos de elementos finitos e infinitos (FE-IE), combinação dos métodos de elementos finitos e elementos de fronteira (FE-BE), método Pipe-in-Pipe (PiP) e método de aproximação de diferenças finitas, que são alguns dos métodos mais conhecidos. Muitos métodos criados recentemente foram possíveis devido aos computadores de alta performance que permitem resolver os problemas mais realisticamente [17].

As análises 2D são muito atraentes devido à eficiência computacional, embora não permitam incorporar no cálculo a influência da direção do movimento do comboio. Em alternativa, modelos 3D permitem um maior realismo da modelação, exigindo requisitos computacionais elevados, trazendo por isso limitações às simulações que se podem realizar e à aplicabilidade em situações complexas. Para contornar as dificuldades dos modelos 2D e 3D, encontram-se também na literatura modelos 2.5D, que consideram que a geometria do problema se mantém constante ao longo de uma direção, mas que as cargas aplicadas podem ser 3D ou até cargas móveis [17].

Caso as fontes dinâmicas existissem em meios infinitos e homogêneos a irradiação da energia seria uniforme, resultando direções de propagação lineares. Contudo, os meios de propagação, em geral, são heterogêneos, quer pela presença de camadas de materiais diferentes ou inclusões. Quando determinada onda elástica atinge a fronteira entre dois materiais sofre fenómenos de reflexão, propagação e difração [9].

Mesmo para casos não tão complexos como um solo homogêneo com superfícies livres e excitados por um pulso mecânico, diversos tipos de ondas são geradas como demonstradas no Ponto 2.2, e deve-se estudar todo o campo de ondas geradas devido à excitação de uma carga, como o comboio passando na superfície. Um método de elementos finitos em 3D no domínio do tempo (TD-FEM) foi desenvolvido por Delfim Soares [18] que permite a análise de todo o fenómeno. Este método foi combinado com um multidimensional e dinâmico sistema de amortecimento e pode ser definido pela equação (8) [19],

$$F=F_I+F_D+F_S \quad (8)$$

onde  $F=F(t)$  é a carga aplicada,  $F_I=M\ddot{U}(t)$  é a força de inércia,  $F_D=C\dot{U}(t)$  é a força de amortecimento e  $F_S=KU(t)$  é a força elástica;  $M$  é a matriz de massa e  $K$  é a matriz de rigidez;  $C=\alpha_c.M+\beta_c.K$  é a matriz proporcional de amortecimento (Rayleigh), com  $\alpha_c$  e  $\beta_c$  calculados de

acordo com o fator de amortecimento  $\xi$  atingido entre as frequências de 30 e 120 Hz;  $\ddot{U}=\ddot{U}_{(t)}$ ,  $\dot{U}=\dot{U}_{(t)}$  e  $U=U_{(t)}$  são, respectivamente, o vetor da aceleração, o vetor da velocidade e o vetor de deslocamento, ao longo do tempo,  $t$ . Uma obtido as matrizes  $M$ ,  $C$  e  $K$ , a integração pelo tempo pode ser efetuada. A equação principal usada para a determinação do deslocamento é apresentada na equação (9) [19],

$$E \cdot U^{n+1} = E \cdot \left( U^n + \frac{1}{2} \Delta t \dot{U}^n + \frac{1}{2} \Delta t \dot{U}^{n+1} \right) - \frac{1}{2} \Delta t^2 C \dot{U}^{n+1} - K \cdot \left[ (\beta b_1 b_2) \Delta t^3 \dot{U}^n + \left( \frac{1}{16} + \beta b_1 \right) \Delta t^3 \dot{U}^{n+1} \right] \quad (9)$$

e a equação para a velocidade está demonstrada na equação 10:

$$E \cdot \dot{U}^{n+1} = \mathfrak{S}_F^{n+\frac{1}{2}} + M \dot{U}^n - \frac{1}{2} \Delta t \cdot C \dot{U}^n - K \cdot \left[ \Delta t U^n + \frac{1}{2} \Delta t^2 \dot{U}^n \right] \quad (10)$$

onde:  $E = M + \frac{1}{2} \Delta t \cdot C$  é a matriz efetiva;  $n$  é o número de passos no tempo;

$\Delta t = 3.571 \sqrt{\max(\text{eig}(K, M))}$  é a duração dos passos no tempo;

$\beta=1$ ,  $b_1=8.567 \times 10^{-3}$  e  $b_2=8.590 \times 10^{-1}$  são os parâmetros de integração para o novo modelo;

$\mathfrak{S}_F^{n+\frac{1}{2}} = \beta_1 \Delta t \cdot F^n + \beta_2 \Delta t F^{n+1}$ , com  $\beta_1=\beta_2=1/2$ , usando regra quadrada trapezoidal ou  $\beta_1=1$  e  $\beta_2=0$ , extendendo o recurso de carga.

Uma das características inovadoras deste método é que é baseado somente no passo único da relação deslocamento e velocidade, sendo assim, permanece verdadeiramente como auto inicial; não exige que nenhum sistema de equações seja tratado para análise; fornece os erros de alongamento de períodos reduzidos; permite simulação da dissipação numérica para os modos de alta frequência (para  $\beta>0$ ); exibe grande limite de estabilidade; tem precisão de segunda ordem e essas são algumas das características que podem ser ressaltadas desse modelo, comprovando a eficiência do mesmo. O modelo é ainda capaz de demonstrar análises precisas considerando relativamente a grande quantidade de passos temporais e ter grande estabilidade, minimizando a maior desvantagem dos procedimentos explícitos, permitindo intervalos de tempo observados somente em análises implícitas precisas, apresentando bons resultados e não dependendo grande custo computacional [19].

## 2.6 Métodos de mitigação

O controle eficiente do ruído ambiental e da vibração requer um bom entendimento dos diferentes mecanismos de geração e caminhos de propagação, se estes não forem adequadamente separados durante a análise, quaisquer propostas subsequentes de mitigação podem ter resultados limitados [6].

Mesmo sabendo-se da importância indiscutível de um modelo de projetos inicial, os estágios avançados de projeto de novas linhas ferroviárias exigem o uso de métodos numéricos avançados para prever e mitigar os problemas potenciais para a construção [16].

O sistema de lajes flutuantes é uma das soluções de mitigação mais utilizadas na fonte para controle das vibrações induzidas nos edifícios devido ao tráfego ferroviário subterrâneo. A análise da simulação com modelo numérico permite determinar as vibrações nas lajes de piso na direção vertical devido a um campo de ondas incidente induzido pelo tráfego. Destaque-se que a introdução de elementos resilientes na pista é uma ação corretiva comum para mitigar as vibrações induzidas pelo tráfego. No entanto, esta atenuação nas frequências mais alta é acompanhada por um aumento dos níveis de vibração na faixa de frequências mais baixas, o que é bastante relevante para a análise de vibração nos edifícios [1].

As práticas de mitigação e/ou limites de aceitação para a vibração variam de país para país; estes podem ser definidos para um nível absoluto de vibração ou para um aumento devido à atualização planejada. A aplicação de medidas de mitigação às linhas ou edifícios existentes é muitas vezes dispendiosa e pode ser proibitiva. Se considerado necessário, medidas para reduzir a vibração podem ser aplicadas à fundação do edifício e são normalmente uma opção viável ainda durante a fase de projeto, sendo preferível que sejam aplicados meios de mitigação da vibração diretamente sobre a rodovia ou ferrovia, melhorando o asfalto ou materiais utilizados [6].

As soluções de mitigação das vibrações induzidas por transporte podem tipicamente ser agrupadas em diferentes grupos, aquelas que atuam na fonte, no recetor e aquelas que atuam ao longo da propagação no meio. As soluções que atuam na fonte incluem a adição de elementos de amortecimento nos carris. Para aqueles que atuam no recetor podemos citar sistemas de isolamento que protegem o edifício. E, para o meio, pode ser qualquer opção colocada no meio entre a fonte e o recetor que mude o padrão de propagação das ondas elásticas, como paredes enterradas, trincheiras (cheias ou vazias) e blocos de inércia. No entanto, para as trincheiras, existem algumas dificuldades relacionadas com a eficiência da técnica que dependem particularmente da profundidade para baixas frequências [19].



---

Este trabalho foca-se apenas em duas soluções de mitigação que atuam no meio, a trincheira vazia e a parede enterrada em betão. A trincheira vazia é muito indicada para atenuar a vibração no solo causada por máquinas e se assemelha a uma barreira acústica. Simplificadamente, pode-se dizer que a vibração é difratada ao atingir a trincheira e apenas uma fração da vibração original atinge a parte atrás da trincheira. Na prática, não se constroem trincheiras com lados verticais pois esses não são estáveis e recomenda-se a construção de lados com certa inclinação ou com paredes de reforço [20].

A parede enterrada pode ser definida como uma trincheira que é preenchida com algum material, normalmente, material mais macio que o meio, mas quando preenchida torna-se menos eficiente do que quando comparada com a sua versão vazia, pois o material ainda transmite alguma vibração. Os materiais para preenchimento mais comuns são o solo-bentonita, poliestireno expandido ou outros materiais em geo-espuma, como poliuretano, pois esses materiais macios conseguem equilibrar a pressão da terra ao redor. As trincheiras mostram-se ser menos eficientes quando distantes da fonte [20].

A construção de uma barreira no solo entre a linha e as instalações parece ser uma medida muito cara para situações já existentes. Isso pode ser associado a estimativa bastante conservadora do ciclo de vida dessas medidas (40 anos para uma barreira de betão e 20 anos para uma trincheira vazia) [6].

A eficiência das paredes enterradas depende significativamente de muitos parâmetros como a distância à fonte, a dinâmica do comboio de carga, a geometria da barreira, e a incompatibilidade de impedância entre o solo e o material de preenchimento. [21]

### 3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho deve-se analisar exemplos de aplicações de um modelo numérico. Neste capítulo abordam-se as metodologias utilizadas, explicando qual o modelo numérico adotado e suas características mais relevantes para este trabalho, os detalhes construtivos dos dois métodos de mitigação escolhidos, quais os cenários que permitissem a maior compreensão sobre a propagação das ondas e comparação e, por fim, demonstrar como foi definida a camada de amortecimento necessária para que os modelos reproduzam as condições de um meio infinito.

#### 3.1 Modelo numérico

Para este trabalho será utilizado o método numérico de elementos finitos com marcha no tempo, o qual foi descrito no Ponto 2.6.

O software Matlab foi o escolhido para a realização dos modelos devido à sua alta performance e facilidade de utilização. As equações (7), (8) e (9) foram programadas da mesma forma como foram apresentadas. Foram definidos os modelos em estado plano de deformação 2D (apenas coordenadas  $x$  e  $y$ ) com uma carga unitária pontual que simula um pulso de Ricker. Esta carga pontual simula o que seria a carga de um meio de transporte naquele local.

O pulso de Ricker é uma onda teórica obtida através da resolução da equação diferencial de Stokes, levando em consideração o efeito da viscosidade newtoniana, onde a atenuação é proporcional ao quadrado da frequência [22].

Como o método utilizado é de elementos finitos, é necessário que para a execução da simulação e o cálculo os modelos sejam discretizados, ou seja, a região seja dividida em elementos triangulares com menor dimensão. Quanto maior a discretização, ou seja, menores elementos triangulares formados, maior a precisão da solução. Porém, discretizações muito altas exigem computadores com desempenhos muito altos, o que limitou a discretização utilizada para este trabalho em valores máximos em torno de 0,25 m e 0,1 m. A Figura 8 demonstra a discretização de um modelo para elementos de aproximadamente 0,25 m.

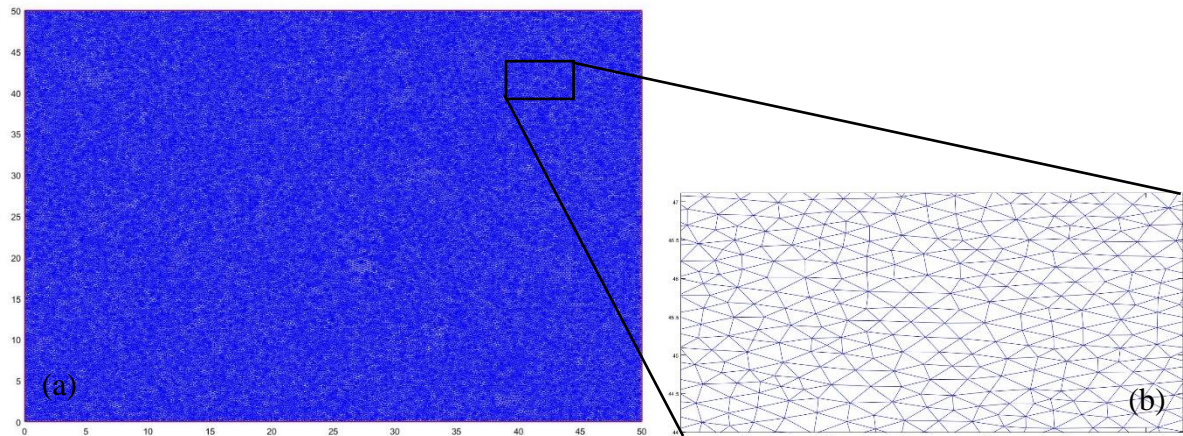


Figura 8 – Discretização de um modelo em 0,25m. Sendo (a) a vista do modelo completo e (b) a ampliação dos elementos triangulares

O solo real é considerado um meio contínuo infinito por ter grandes dimensões. Para evitar que ocorram reflexões não desejadas devido à limitação do modelo é necessário adicionar uma camada de amortecimento para mitigar completamente as vibrações a partir do limite de encontro entre o local do caso de estudo e essa camada.

Como apresentado no Ponto 2.6, a equação de amortecimento que compõe a Equação (8) pode ser descrita pela Equação (11), que é a matriz proporcional de amortecimento (Rayleigh).

$$C = \alpha_c \cdot M + \beta_c \cdot K \quad (11)$$

onde:  $M$  é a matriz de massa

$K$  é a matriz de rigidez

$\alpha_c$  e  $\beta_c$  são variáveis calculadas a partir do fator  $\xi$  considerado de amortecimento

Para o método numérico escolhido considera-se apenas a matriz de massa para realizar o amortecimento, ou seja,  $\beta_c=0$ . Logo, pode-se representar a matriz de amortecimento ( $C$ ) como apresentado na Equação (12).

$$C = \frac{\omega}{2} \xi * M \quad (12)$$

onde:  $\omega$  é a frequência

Para tanto deve-se adicionar uma fórmula de amortecimento exponencial que pode ser expressa pela equação (13), que calcula o fato de amortecimento ( $\xi$ ) para a onda em cada passo de forma exponencial. A Figura 9 demonstra o modelo com uma carga em vermelho na superfície e com a camada de amortecimento, e como o amortecimento é ampliado ao longo da propagação da onda na camada, implicando em um amortecimento durante toda a permanência da onda na camada de amortecimento e tanto maior quanto mais longe do limite entre a camada de estudo e a de amortecimento. Utilizando a equação de amortecimento de forma exponencial pretende-

se impedir que qualquer reflexão indesejável surja na ligação das duas camadas, o que alteraria o resultado quando comparado a um caso real.

$$\xi = \left( e^{0.04 * \left(\frac{d}{a}\right)^2} - 1 \right) * 35 \quad (13)$$

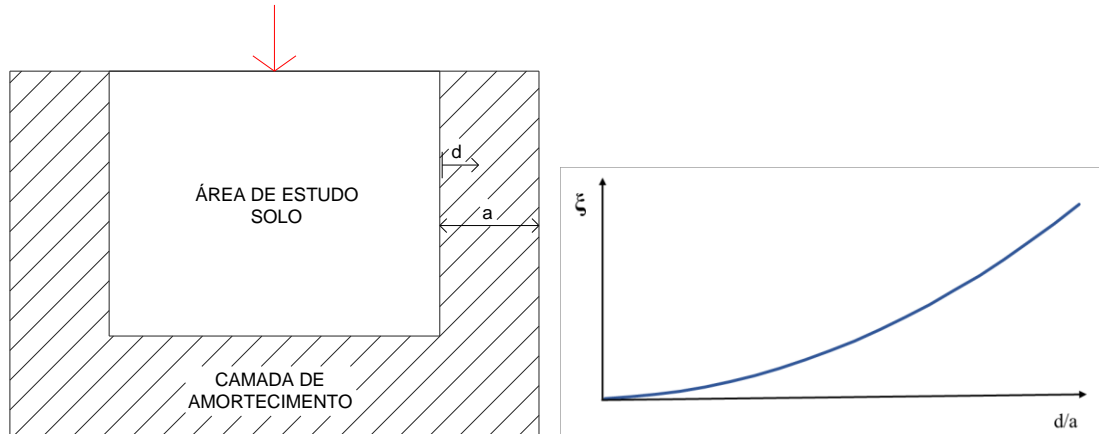


Figura 9 – Modelo com camada de amortecimento e desenvolvimento do amortecimento.

Para a análise de cada caso de estudo proposto é necessário definir qual frequência será analisada pois o pulso de Ricker, quando alterado se torna mais limitada ou mais extenso, como mostra na Figura 10 e para frequências diferentes, existem comprimentos de ondas ( $\lambda$ ) diferentes, que podem ser determinados pela equação (14). Afirmando que quanto menor a frequência, maior o comprimento da onda, logo, determina-se que será utilizada a frequência 50 Hz para os casos, onde o pulso está definido e é uma frequência média dentro da extensão definida pela ISO 14837 Mechanical vibration [3], que determina que as vibrações induzidas pelos comboio estão entre 1 a 80 Hz.

$$\lambda = \frac{\text{velocidade da onda}}{\text{frequência}} \quad (14)$$

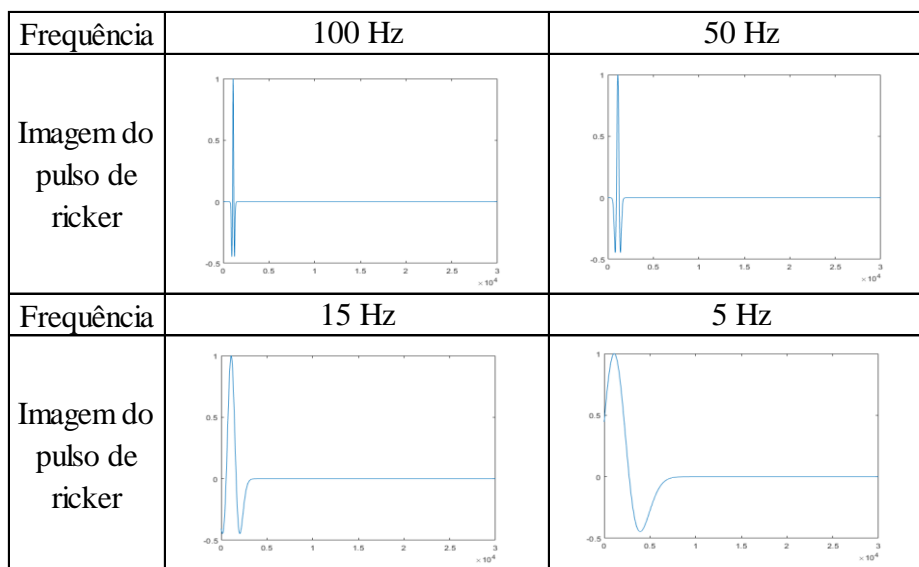


Figura 10 - Pulso de Ricker para diferentes frequências

Como o modelo numérico é com marcha no tempo, deve-se definir a quantidade de passos temporais a serem utilizados. Os passos temporais representam as divisões do tempo que o modelo vai necessitar de calcular. Um passo mais baixo e em maior quantidade, implica em muito mais cálculos para a propagação da onda do que levaria para passos temporais mais altos e em menores quantidades. Um número insuficiente de passos temporais, não permite analisar toda a vibração do modelo. Enquanto que uma quantidade demasiado elevada de passos temporais, depende muito tempo, esse desempenho computacional superior e por vezes não apresenta quaisquer modificações no modelo após um certo tempo. Neste trabalho, adotou-se um passo de 100 ms e variou-se a quantidade.

Os resultados quantitativos obtidos pelo método numérico neste trabalho não permitem obter valores uteis reais, mas permite a comparação entre modelos para estudar a propagação da onda em modelos com diferentes parâmetros e a resposta dos métodos de mitigação adotados.

### 3.2 Métodos de mitigação adotados

Os métodos de mitigação adotados para os estudos de caso foram a trincheira vazia e a parede enterrada, devido à facilidade para representação e avaliação no modelo e por serem dois métodos vastamente utilizados e simples.

Para a parede enterrada foi considerado o material de betão, com módulo de elasticidade de 30 GPa, coeficiente de Poisson de 0.15 e massa volúmica de 2500 kg/m<sup>3</sup>, a Figura 11 demonstra o esquema de como ficaria um modelo com uma parede enterrada. E, para a trincheira vazia, considerou-se um corte retangular no solo do modelo, ambas foram colocadas em  $x = 40$  m na

superfície, com espessura de 0,40 m e com uma profundidade variável de 3 ou 5 m, a Figura 12 demonstra o esquema de como ficaria um modelo com uma trincheira vazia.

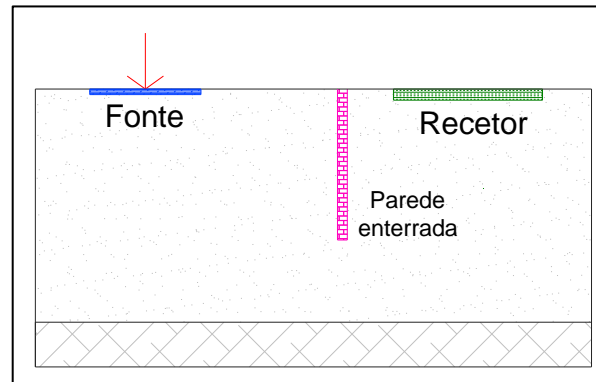


Figura 11- Esquema de um modelo com parede enterrada

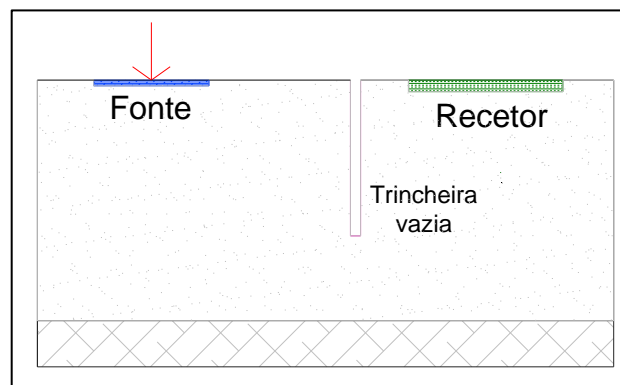


Figura 12- Esquema de um modelo com trincheira vazia

### 3.3 Definição dos cenários adotados

A partir das considerações feitas no Ponto anterior, foi proposto para as realizações dos estudos de caso, um conjunto de cenários-tipo para análise da propagação de vibrações. Estes cenários irão contemplar a propagação da onda em meios homogéneos e heterogéneos e depois a simulação da circulação de meios de transporte em túnel ou à superfície para o meio homogéneo. Estes cenários permitiram exemplificar a utilização do modelo numérico para diferentes parâmetros.

O primeiro cenário irá determinar qual a camada de amortecimento mais indicada para cada tipo ou conjunto de solos, depois serão analisadas as propagações das vibrações em meios homogéneo e heterogéneos. Os próximos cenários propostos permitem compreender o comportamento da onda quando é adicionada uma estrutura de túnel a um sistema de solo homogéneo e, complementarmente, verificar a eficiência de diferentes métodos de mitigação.

Após analisar o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e massa volúmica do solo, que são fatores que influenciam a problemática causada pela vibração, foram propostos os seguintes cenários-tipos:

➤ Conjunto de modelos de propagação de vibrações para um conjunto de meios homogêneos de solos com uma carga pontual na superfície e considerando um recetor na superfície, a uma distância da fonte de 15 m ( $x_{\text{recetor}}=40$  m). Os solos escolhidos foram areia compacta, argila dura, areia fofa, argila mole e rocha.

Este primeiro conjunto de simulações em solos homogêneos, terá como objetivo determinar qual é a melhor camada de amortecimento para cada tipo de solo. Impedindo qualquer reflexão não desejada que poderia ocorrer devido à limitação do modelo numérico, e também demonstra o comportamento da onda quando não há qualquer obstáculo ou diferentes camadas de solos.

➤ Conjunto de três modelos de propagação de vibrações para um meio heterogêneo de argila dura e rocha, para coordenadas de divisão em  $y=10$  m,  $y=25$  m e  $y=40$  m. Com uma carga pontual na superfície, representando a passagem de um transporte na superfície. Considerando um recetor na superfície a uma distância de 15 m ( $x_{\text{recetor}}=40$  m).

Com as simulações do segundo conjunto proposto de cenários-tipo pode-se analisar qual a influência da ligação entre a argila dura e a rocha. Esse encontro entre diferentes solos gera reflexões na camada mais superficial onde está a carga e o recetor.

➤ Conjunto de três modelos de propagação de vibrações para um meio heterogêneo de areia compacta e rocha, para coordenadas de divisão em  $y=10$  m,  $y=25$  m e  $y=40$  m. Com uma carga pontual na superfície, representando a passagem de um transporte na superfície. Considerando um recetor na superfície a uma distância de 15 m ( $x_{\text{recetor}}=40$  m).

Assim, pode-se analisar se o mesmo que aconteceu para o conjunto de modelos propostos anteriormente se repete quando o solo superior é alterado para areia compacta.

➤ Conjunto de três modelos de propagação de vibrações para um meio homogêneo de areia compacta com uma carga pontual na coordenada onde ficaria a soleira de um túnel. O túnel tem 20 m de profundidade do centro à superfície. Primeiramente, será abordado um modelo sem a estrutura do túnel, depois com o furo onde ficaria o túnel e, por fim, a estrutura do túnel com o anel em betão. Considerando recetores ao longo de toda a superfície;

Deste modo, possibilita notar as alterações de comportamento da onda com a adição da estrutura de um túnel.

➤ Conjunto de dois modelos de propagação de vibrações para um meio homogêneo de areia compacta com uma trincheira vazia em  $x=40$  na superfície. O primeiro modelo incorpora uma trincheira vazia de 3 m de profundidade por 0,4 m de espessura, e o segundo para uma trincheira vazia de 5 m de profundidade com mesma espessura. Considera uma carga pontual na soleira do túnel e recetores ao longo de toda a superfície.

É possível analisar a influência de uma trincheira vazia para mitigar a passagem da vibração.

➤ Um modelo de propagação de vibrações para um meio homogêneo de areia compacta com uma parede enterrada em  $x=40$  m na superfície. Esta parede enterrada é preenchida com betão e tem 5 m de profundidade por 0,4 m de espessura. Considera uma carga pontual na soleira do túnel e recetores ao longo de toda a superfície.

Foi possível determinar a influência de uma parede enterrada para mitigar a passagem da vibração.

➤ Conjunto de três modelos de propagação de vibrações para um meio homogêneo de argila dura com a estrutura do mesmo túnel dos modelos anteriores. No segundo modelo, será acrescentada uma trincheira vazia na superfície com 5 m de profundidade por 0,4 m de espessura, em  $x=40$  m. No terceiro modelo, será acrescentada uma parede enterrada em betão na superfície com 5 m de profundidade por 0,4 m de espessura, em  $x=40$  m. Considera uma carga pontual na soleira do túnel e recetores ao longo de toda a superfície.

É possível avaliar as diferenças de comportamento quando se modifica o solo para um de argila dura.

➤ Conjunto de três modelos de propagação de vibrações para um meio homogêneo de areia compacta com uma carga pontual na superfície em cima de uma placa de betão de 10 m x 0,5 m. Para o primeiro modelo, é só considerado uma carga na superfície sem quaisquer obstáculos. Para o segundo, acrescenta-se uma trincheira vazia com 5 m de profundidade por 0,4 m, em  $x=40$  m na superfície. E, no terceiro, recorre-se a uma parede enterrada de betão com as mesmas características.

Permite analisar qual seria o comportamento de ondas simulando uma carga na superfície, acima de uma placa de betão, e notar a eficiência dos métodos de mitigação adotados. A carga na superfície acima da placa, tem por objetivo simular o transporte na superfície que passa acima de uma via.



➤ Conjunto de três modelos para um meio homogêneo de areia compacta com uma estrutura de túnel a 10 m de profundidade do centro do túnel à superfície. O primeiro modelo considera somente o túnel na nova posição. Depois, com uma trincheira vazia de 5 m de profundidade, em  $x=40$  m. E, por fim, um modelo para uma parede enterrada de betão com 5 m de profundidade, em  $x=40$  m. São considerados recetores ao longo de toda a superfície.

Permitiu analisar a diferença de comportamento da carga quando se sobe a estrutura do túnel em 10 m e a eficiência dos meios de mitigação adotados.

### 3.4 Determinação da camada de amortecimento

Antes de simular os modelos propostos deve-se definir qual a dimensão da camada de amortecimento que deve ser usada para cada tipo de solo. A partir do primeiro conjunto de modelos propostos no Ponto 3.3 para os solos homogêneos de areia compacta, argila dura, areia fofa, argila mole e rocha, pode-se verificar quais são as larguras da camada de amortecimento recomendadas para cada solo.

A propagação da onda no solo depende das características do solo, no Quadro 1 estão sistematizados os valores considerados neste trabalho para o módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), massa volúmica ( $\rho$ ), velocidade da onda primária ( $v_p$ ), velocidade de onda secundária ( $v_s$ ) e comprimento de ondas ( $\lambda$ ) dos materiais e solos estudados.

Quadro 1- Características de cada solo ou material

Sigla	Solo ou material	Freq.	E	Coef. de	massa volúmica	Vp (vel. de comp.)	Comp. onda primária	Vs (vel. trans.)	Comp. onda secundária
		Hz	Pa	Poisson	kg/m <sup>3</sup>	m/s	m	m/s	m
AC	Areia compacta	50	7.40E+08	0.35	2000.00	770.60	15.41	370.19	7.40
AD	Argila Dura		1.50E+08	0.40	2000.00	400.89	8.02	163.66	3.27
AF	Areia Fofa		1.70E+07	0.40	1600.00	150.89	3.02	61.60	1.23
AM	Argila Mole		3.50E+07	0.40	1500.00	223.61	4.47	91.29	1.83
Ro	Rocha		1.50E+09	0.40	1800.00	1336.31	26.73	545.54	10.91
B	Betão		3.0 E+10	0.15	2500	3559.61	71.19	2284.16	45.68

A partir do Quadro 1 é possível observar que os casos com maiores comprimentos de ondas estão associados a solos mais duros, como a rocha em que a onda primária tem um comprimento de 26,73 m, e esses necessitam de camadas de amortecimento mais largas para que a vibração seja mitigada completamente.

Sendo assim, são propostas 5 hipóteses para definir a camada de amortecimento para cada solo mais duro e considerado apenas um modelo para os solos mais moles por serem modelos mais compactos. Primeira tentativa com a largura da camada equivalente a 0,5 vezes o comprimento da onda primária, segunda tentativa com 1 vez a camada, terceira tentativa com 1,5 vezes o comprimento da onda primária, quarta tentativa com 2 vezes o comprimento da onda primária e última tentativa uma camada com 2,5 vezes o comprimento de onda primária. O Quadro 2 demonstra os valores de cada tentativa para cada solo.

Quadro 2 - Largura da camada de amortecimento considerada para cada modelo

Solo	Sigla	Largura camada amortecimento
		m
Areia compacta	AC_1	8
Areia compacta	AC_2	15
Areia compacta	AC_3	23
Areia compacta	AC_4	31
Areia compacta	AC_5	40
Areia compacta	AC_6	20
Argila Dura	AD_1	4
Argila Dura	AD_2	8
Argila Dura	AD_3	12
Argila Dura	AD_4	16
Argila Dura	AD_5	20
Areia Fofa	AF_5	8
Argila Mole	AM_5	11
Rocha	Ro_1	13
Rocha	Ro_2	27
Rocha	Ro_3	40
Rocha	Ro_4	53
Rocha	Ro_5	67

Para os modelos considera-se uma malha de 50 m por 50 m com uma carga pontual na superfície em  $x=25$  m, que emite um pulso de Ricker unitário e considera-se um recetor na superfície à uma distância de 15 m da fonte, em  $x = 40$  m.

Para a simulação dos modelos em grande maioria foi utilizada uma discretização de malha de 0,2 m e 1500 passos temporais. Exceto para os solos mais moles, como areia fofa e argila mole,

que necessitavam de uma discretização de 0,1 m e um número maior de passos temporais de 2000 para garantir um resultado confiável.

Os resultados de todos os modelos propostos pelo Quadro 2 estão disponíveis no Anexo, na Figura A1 e A2 para a areia compacta, Figura A3 e A4 para a argila dura, Figura A5 e A6 para a rocha. Para os casos dos solos mais moles, como a argila mole e areia fofa, não foi necessário realizar diversas tentativas e adotou-se a camada de amortecimento de maior espessura, como demonstrado no Quadro 2.

No final observou-se que os deslocamentos em y são majoritariamente maiores que para os deslocamentos em x, esse fator pode ser explicado devido à carga aplicada ser na direção de y (carga vertical).

A camada de amortecimento de 2,5 vezes o comprimento da onda primária do solo considerado garante que não haja quaisquer ondas refletidas e o modelo pode ser considerado como estando em um meio “infinito”, se igualando a um solo real. Porém, uma grande largura de camada de amortecimento sobrecarrega o computador e despende um tempo que não seria necessário para a simulação do modelo.

Para aumentar a eficiência, recomenda-se encontrar uma camada de amortecimento menor capaz de amortecer completamente as possíveis reflexões que alterariam os resultados e de forma que não sobrecarregue o modelo ou o sistema computacional.

Consequentemente, define-se que a camada de amortecimento mais indicada para a areia compacta é com 20 m (AC\_6), para a argila dura com 12 m (AD\_3), para a areia fofa com 8 m (AF\_5), para a argila mole com 11 m (AM\_5) e para a rocha com 53 m (Ro\_4).

Para melhor compreensão de quais são as reflexões não desejadas que ocorrem, estão abaixo representadas a Figura 13 e Figura 14. A Figura 13 mostra a onda sendo refletida de volta para a área de estudo, em um modelo para areia compacta com apenas 8 m de camada de amortecimento (AC\_1). A Figura 14 mostra a onda sendo amortecida para areia compacta com 20 m de camada de amortecimento (AC\_6). Para melhorar o entendimento é apresentado a Figura 15, que demonstra claramente a chegada das ondas diretas, compreendidas entre aproximadamente 35 ms e 100 ms, e a depois a quantidade de reflexões que ocorrem para AC\_1 ao longo do tempo. Percebe-se que para AC\_1 grande parte das ondas que chegam à camada de amortecimento são refletidas de volta para a área de estudo demarcada com as linhas tracejadas, o que não ocorre para AC\_6.

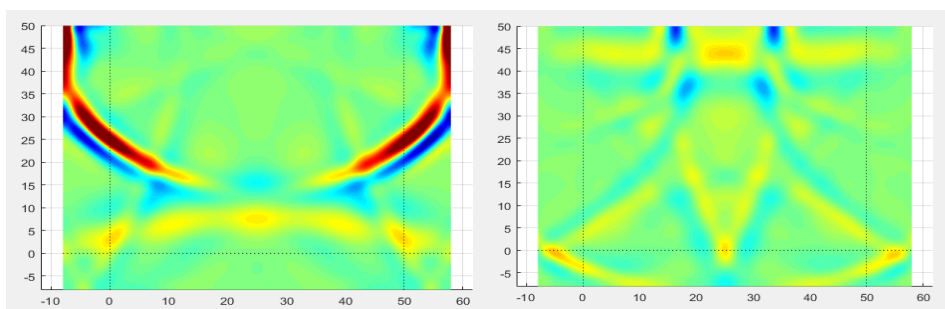


Figura 13 - Onda refletidas no tempo para AC\_1

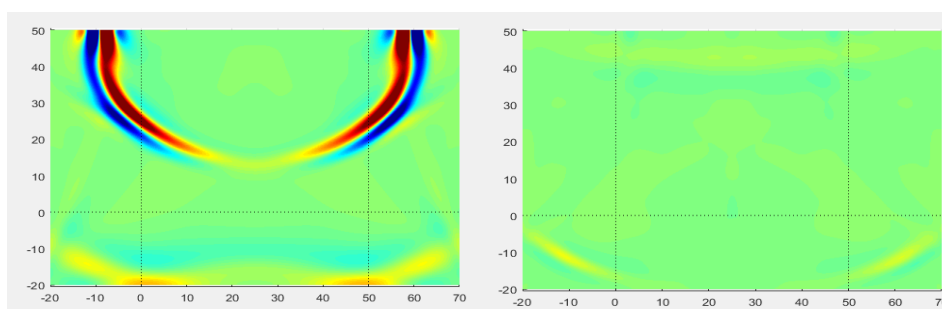


Figura 14 - Onda refletidas no tempo para AC\_6

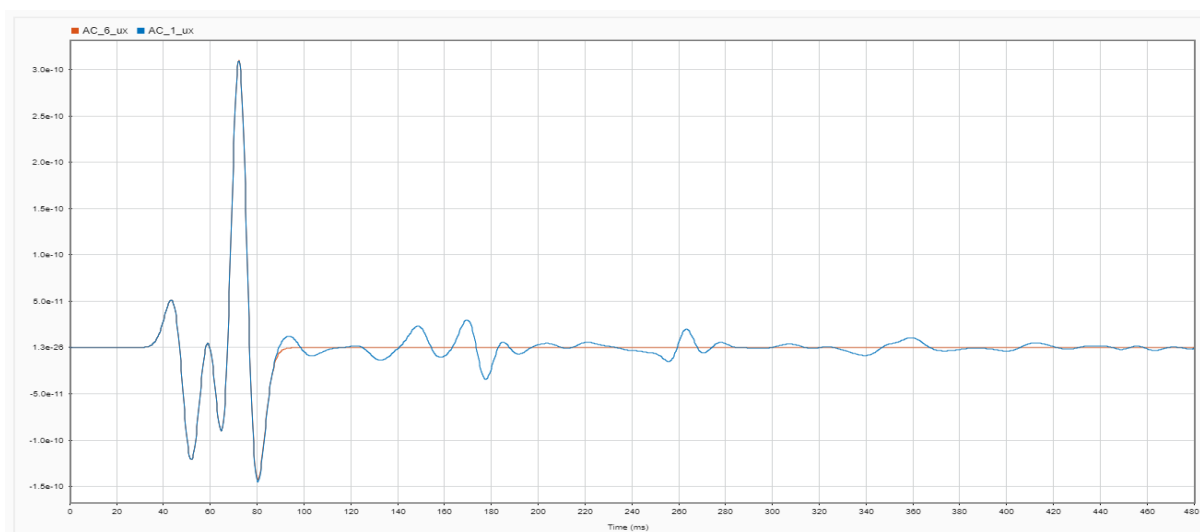


Figura 15 – Deformações para AC\_1 e AC\_6 em x

## 4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Neste capítulo será abordada a realização de cada cenário proposto no Ponto 3.3, dividindo-os em três conjuntos principais: primeiro, solo homogêneo, onde se mostram os resultados obtidos no Ponto 3.4 e que servirá como base para entender o pulso que chega ao recetor sem qualquer obstáculo no meio; segundo, o solo heterogêneo, sendo solo arenoso e solo argiloso, ambos sobre um solo de estrato rochoso; terceiro, sistema com uma estrutura de túnel e adições de métodos mitigatórios de vibração. Estes exemplos permitem que sejam comparados a fim de se perceberem as principais diferenças e comportamentos de onda.

### 4.1 Comportamento do solo homogêneo com uma carga pontual na superfície

É necessário realizar um estudo com exemplos simples para que possa ser compreendido o comportamento da vibração ao longo do meio. Estes exemplos são para o solo homogêneo, os mesmos que foram utilizados no Ponto 3.4 para a definição de qual seria a melhor camada de amortecimento. Neste Ponto serão apresentados os valores obtidos, já considerando a camada de amortecimento mais indicada para cada solo. Os modelos têm 50 m x 50 m, uma carga pontual aplicada na superfície, em  $x=25\text{m}$ , e um recetor na superfície, em  $x=40\text{m}$ .

#### 4.1.1 Solo homogêneo de areia compacta (AC\_6)

Para permitir a visualização com as dimensões utilizadas para a realização do modelo de solo homogêneo de areia compacta (AC\_6) com camada de amortecimento de 20 m, é apresentado o esquema da Figura 16. A carga está representada por uma seta vertical vermelha.

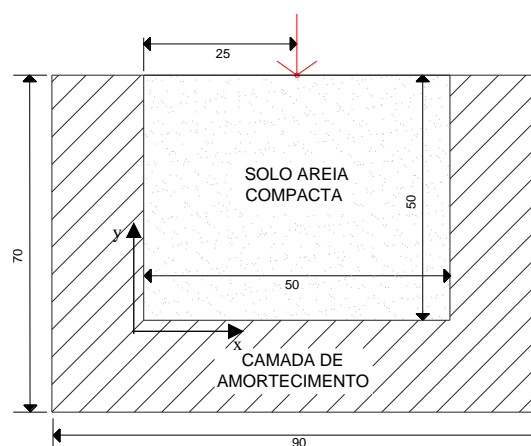


Figura 16 – Representação do modelo AC\_6, com cotas em metros

Aplicou-se a representação do modelo com as características de solo apresentadas no Quadro 1, ao programa com o método numérico descrito e definiu-se uma malha com discretização de 0,2 m e com 1500 passos temporais. O tempo total de simulação foi de aproximadamente 482 ms, o qual foi um tempo necessário para verificar o comportamento completo da propagação da onda. Obtiveram-se ainda os deslocamentos avaliados no recetor ao longo do tempo, como demonstrado na Figura 17.

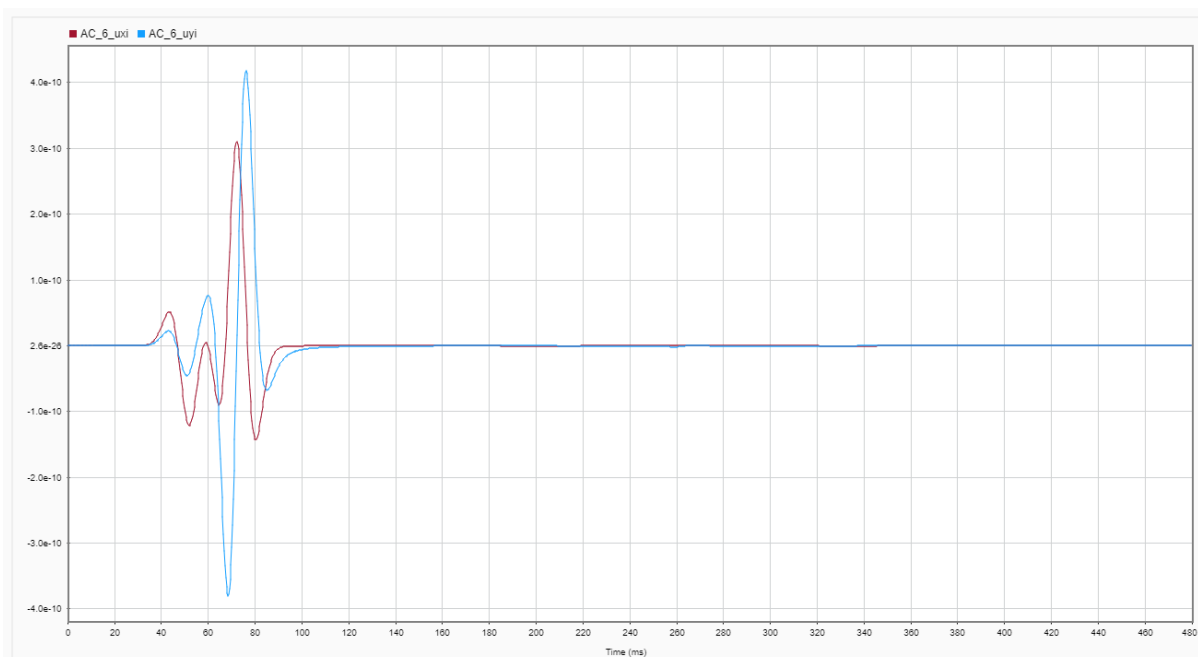


Figura 17 – Deslocamentos calculados para o modelo AC\_6

Sabe-se que a areia compacta tem módulo de elasticidade relativamente alto, o que garante velocidades altas de propagação de onda. Pode-se observar na Figura 17 que as ondas atingem o recetor rapidamente. A onda primária pode ser compreendida entre os tempos de 30 ms e aproximadamente 60 ms e que, um pouco depois observa-se a chegada da onda secundária, que causa um deslocamento mais acentuado tanto para x quanto para y.

No final da passagem das ondas vindas diretamente da fonte (compreendidas entre 35 ms e 120 ms) não é possível notar quaisquer alterações na linha. Essa continuidade na linha após 120 ms, demonstra que não existem quaisquer reflexões não desejadas e que a camada de amortecimento está funcionando perfeitamente. Aqui também se observa como o deslocamento em y é superior ao deslocamento, em x, fato devido à carga ser vertical.

#### 4.1.2 Solo homogéneo de argila dura (AD\_3)

Para permitir a visualização com as dimensões utilizadas para a realização do modelo de solo homogéneo de argila dura (AD\_3) com camada de amortecimento de 12 m, é apresentado o esquema da Figura 18. A carga está representada por uma seta vertical vermelha.

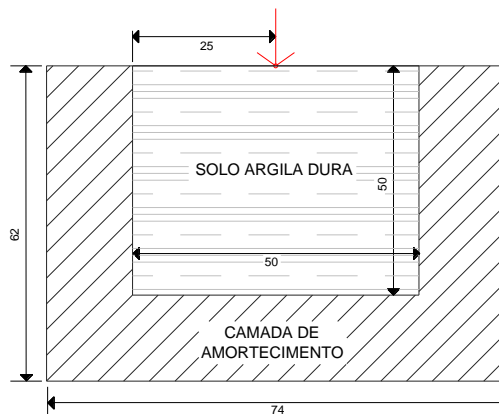


Figura 18 – Representação do modelo AD\_3, com cotas em metros

Aplicou-se a representação do modelo descrito na Figura 18 com as características de solo apresentadas no Quadro 1 para a argila dura, ao programa com o método numérico apresentado e definiu-se uma malha com discretização de 0,2 m e com 1500 passos temporais. O tempo total de simulação foi de aproximadamente 930 ms, o qual foi um tempo necessário para verificar o comportamento completo da propagação da onda. Foram obtidos os deslocamentos determinados pelo recetor ao longo do tempo, como ilustrado na Figura 17.

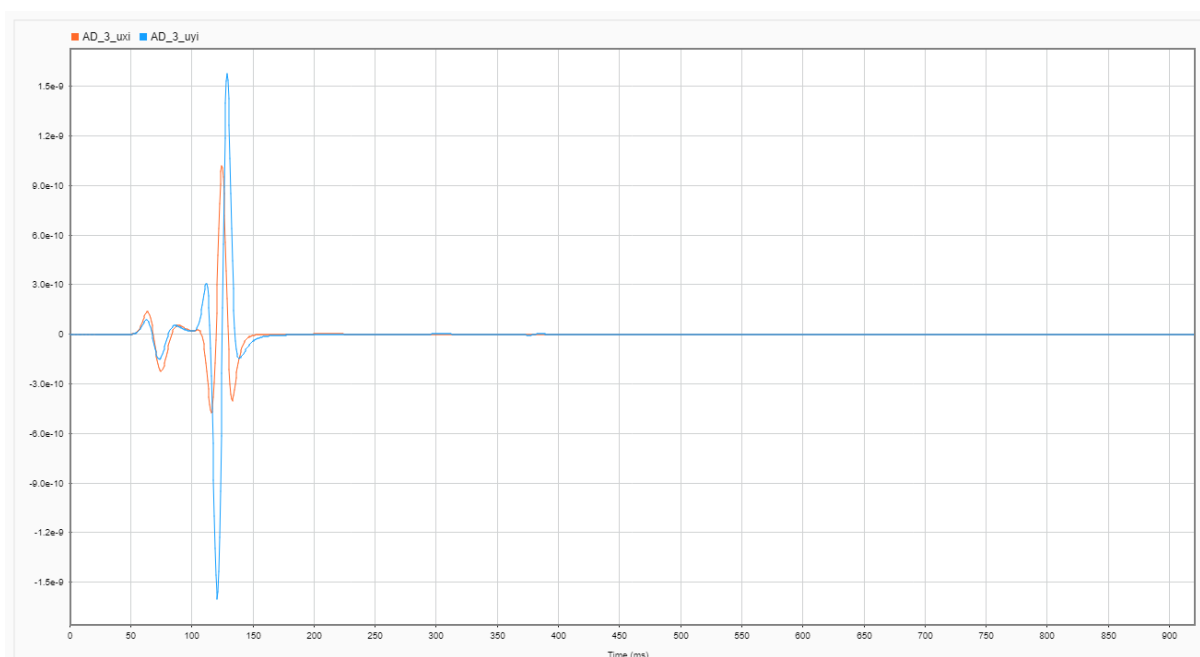


Figura 19 – Deslocamentos calculados para o modelo AD\_3

Pode-se assinalar na Figura 17 que as ondas atingem o recetor não tão rapidamente quanto era para areia compacta, devido às velocidades de ondas serem menores. A onda primária pode ser compreendida entre os tempos de 50 ms e aproximadamente 100 ms e que, em seguida, já se observa a onda secundária, que causa um deslocamento mais acentuado tanto para x quanto para y.

No final da passagem das ondas vindas diretamente da fonte (essas compreendidas entre 50 ms e 175 ms) não é possível notar quaisquer alterações na linha. Essa continuidade na linha após 175 ms demonstra que não existem quaisquer reflexões não desejadas e que a camada de amortecimento está funcionando perfeitamente. Aqui também se nota como o deslocamento em y é superior ao deslocamento em x, o que é devido a carga vertical.

#### 4.1.3 Solo homogéneo de rocha (Ro\_4)

Para permitir a visualização com as dimensões utilizadas para a realização do modelo de solo homogéneo de rocha (Ro\_4) com camada de amortecimento de 53 m, é apresentado o esquema da Figura 20. A carga está representada por uma seta vertical vermelha.

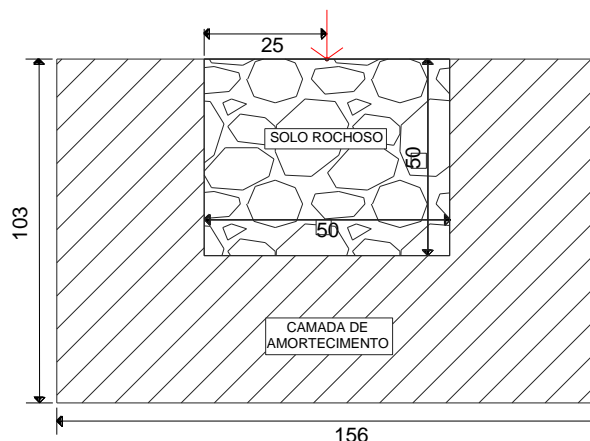


Figura 20 – Representação do modelo Ro\_4, com cotas em metros

Aplicou-se a representação do modelo descrito na Figura 20 com as características de solo apresentadas no Quadro 1 para a rocha, ao programa com o método numérico definido e definiu-se uma malha com discretização de 0,2 m e com 1500 passos temporais. O tempo total de simulação foi de aproximadamente 275 ms, o qual foi um tempo necessário para verificar o comportamento completo da propagação da onda. Foram calculados os deslocamentos avaliados no recetor ao longo do tempo, como demonstrado na Figura 21.



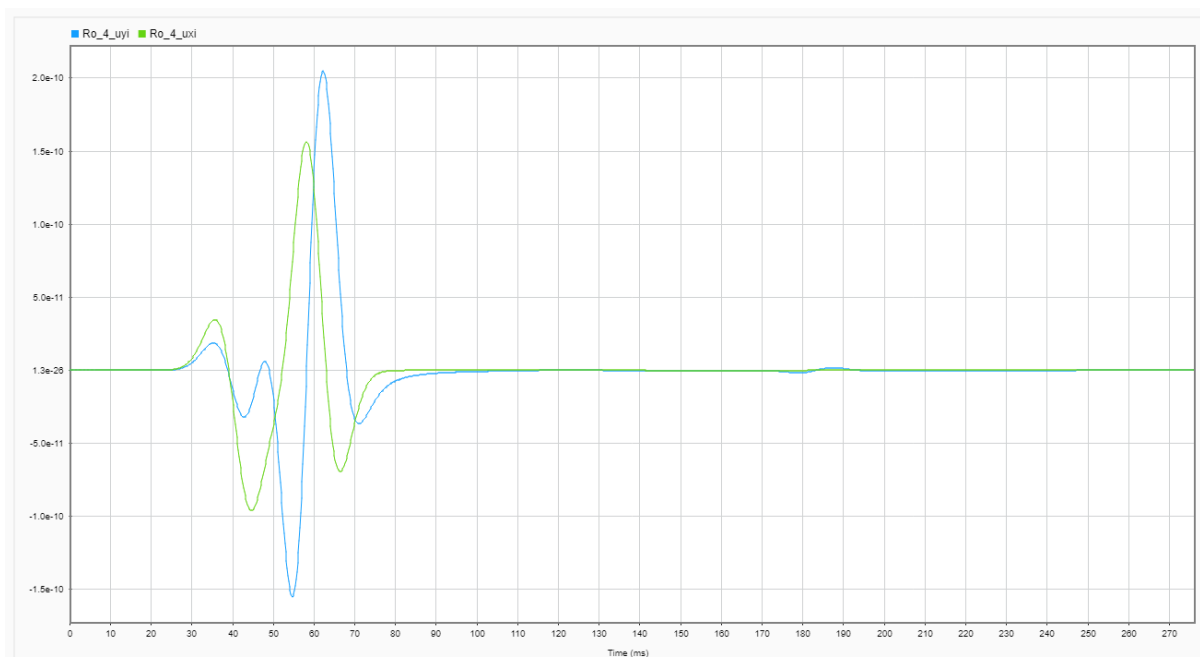


Figura 21 – Deslocamentos calculados para o modelo Ro\_4

A rocha é o solo mais duro utilizado neste trabalho, o que garante velocidades altas de propagação das ondas. Pode-se verificar na Figura 19 que as ondas atingem o recetor rapidamente e não existe um espaço definido antes começar a onda secundária. A onda primária pode ser compreendida começando no tempo de 25 ms e em torno de 45 ms e percebe-se a elevação dos deslocamentos, o que pode ser entendido como a chegada da onda secundária.

No final da passagem das ondas vindas diretamente da fonte (essas compreendidas entre 25 ms e 115 ms) nota-se, para y, que existe uma sútil alteração na linha, em 175 ms, que pode ser associada a uma reflexão não desejada. Essa reflexão não se demonstra prejudicial a atrapalhar os resultados, por ser muito pequena. Considerar uma camada de amortecimento maior para a rocha, implicaria em necessitar de maiores recursos computacionais e tempo para simulação. Aqui também se nota como o deslocamento em y é superior ao deslocamento em x, devido à carga ser vertical.

#### 4.1.4 Solo homogêneo de argila mole (AM\_5)

Para permitir a visualização com as dimensões utilizadas para a realização dos modelos de solo homogêneo de argila mole (AM\_5) com camada de amortecimento de 11 m, é apresentado o esquema da Figura 22. A carga está representada por uma seta vertical vermelha.

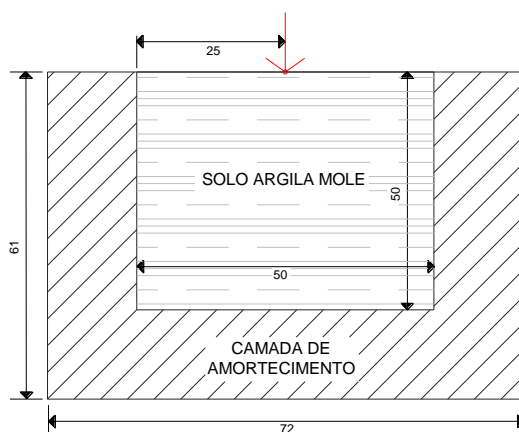


Figura 22 – Representação dos modelos AM\_5, com cotas em metros

Aplicou-se a representação do modelo descrito na Figura 22 com as características de solo apresentadas no Quadro 1 para a argila mole, ao programa com o método numérico desenvolvido e definiu-se uma malha com discretização de 0,1 m e com 2000 passos temporais. O tempo total de simulação foi de aproximadamente 825 ms, o qual foi um tempo necessário para verificar o comportamento completo da propagação da onda. Determinaram-se os deslocamentos avaliados pelo recetor ao longo do tempo, como demonstrado na Figura 23.

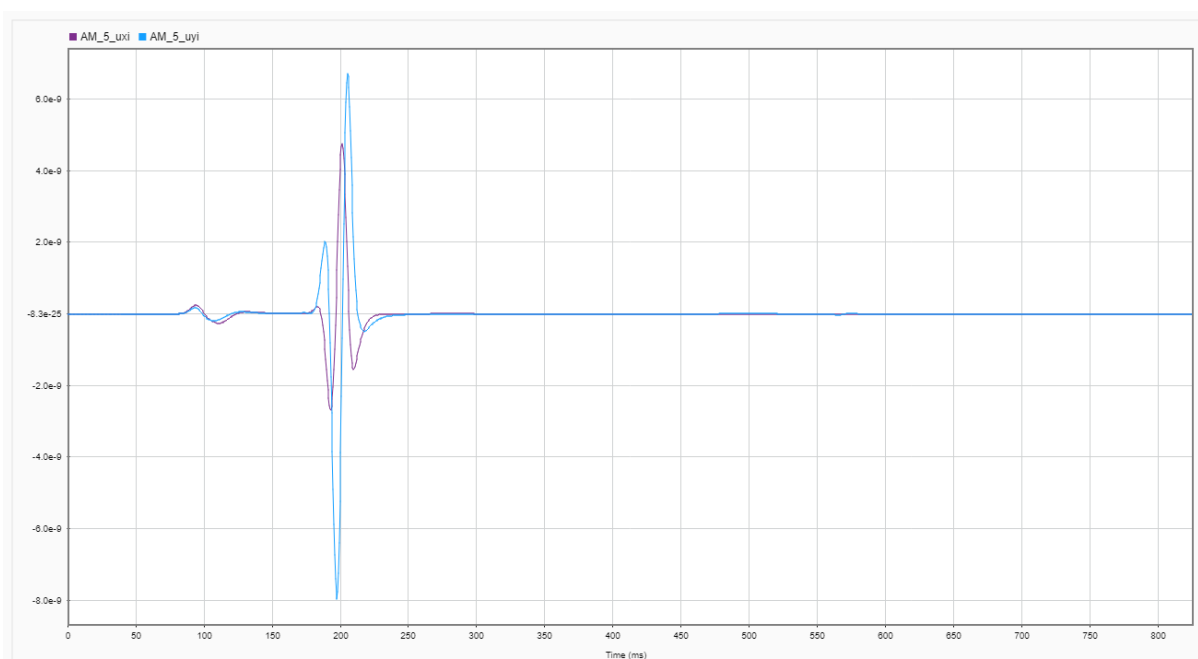


Figura 23 – Deslocamentos calculados para o modelo AM\_5

Observa-se na Figura 23 que a onda primária pode ser compreendida entre os tempos de aproximadamente 80 ms e 140 ms, sendo notório um tempo de estabilidade na deformação e, em torno de 175 ms, a chegada da onda secundária, que causa um deslocamento mais acentuado

tanto para x quanto para y. Este período entre a onda primária e onda secundária, em que não ocorrem deformações, é associado às baixas velocidades das ondas apresentadas pelo solo de argila. Neste caso, consegue-se perceber, claramente, a passagem de ambas as ondas.

No final da passagem das ondas vindas diretamente da fonte (compreendidas entre 80 ms e 250 ms) não é possível notar quaisquer alterações na linha. Essa continuidade na linha após 250 ms, demonstra que não existem quaisquer reflexões não desejadas e que a camada de amortecimento está funcionando perfeitamente. Aqui também se nota como o deslocamento em y é superior ao deslocamento em x, fato devido à carga ser vertical.

#### 4.1.5 Solo homogêneo de areia fofa (AF\_5)

Para permitir a visualização com as dimensões utilizadas para a realização dos modelos de solo homogêneo de areia fofa (AF\_5) com camada de amortecimento de 8 m, é apresentado o esquema da Figura 24. A carga está representada por uma seta vertical vermelha.

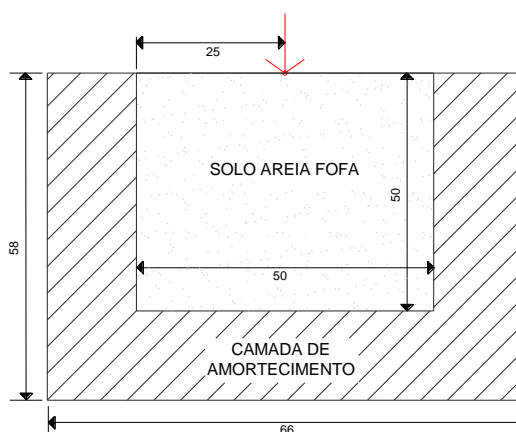


Figura 24 – Representação dos modelos AF\_5, com cotas em metros

Aplicou-se a representação do modelo descrito na Figura 24 com as características de solo apresentadas no Quadro 1 para a areia fofa, ao programa com o método numérico descrito e definiu-se uma malha com discretização de 0,1 m e com 2000 passos temporais. O tempo total de simulação foi de aproximadamente 930 ms, o qual foi um tempo necessário para verificar o comportamento completo da propagação da onda. Foram determinados os deslocamentos observados pelo recetor ao longo do tempo, como demonstrado na Figura 25.

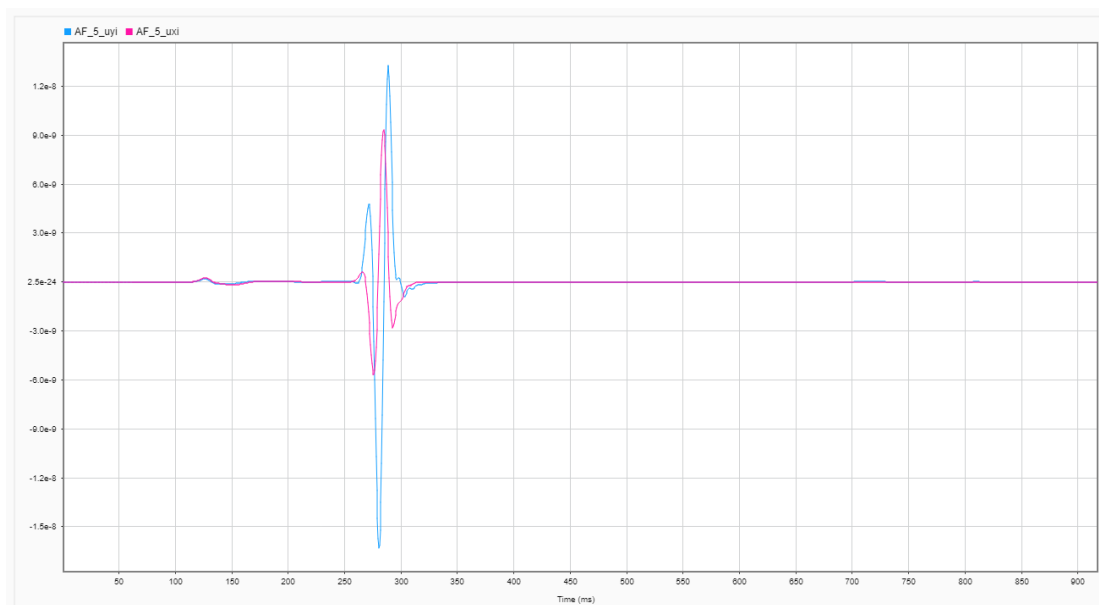


Figura 25 – Deslocamentos calculados para o modelo AF\_5

Regista-se na Figura 25, que a onda primária pode ser compreendida entre os tempos de aproximadamente 120 ms e 175 ms, seguindo-se um intervalo de tempo de estabilidade na deformação, e em torno de 250 ms, chega a onda secundária, que causa um deslocamento muito mais acentuado tanto para x quanto para y. Esse período entre a onda primária e onda secundária, em que não ocorrem deformações, é associado às baixas velocidades de onda que o solo de areia fofa tem. Consegue-se perceber claramente quando as ondas passam. Ao compararmos a areia fofa com a argila mole, nota-se que o tempo entre as ondas aumentou, facto associado a areia fofa ser mais mole e ter velocidades das ondas menores.

No final da passagem das ondas vindas diretamente da fonte (compreendidas entre 120 ms e 330 ms) não é possível observar quaisquer alterações na linha. Essa continuidade na linha após 330 ms, demonstra que não existe quaisquer reflexões não desejadas e que a camada de amortecimento está funcionando perfeitamente. Aqui também se nota como o deslocamento em y é superior ao deslocamento em x, devido à carga vertical.

A comparação de todos os solos apresentados neste Ponto pode ser vista nas Figuras A7 e A8 do Anexo. Uma nota importante que fica claramente visível nas Figuras A7 e A8 é que os solos mais moles apresentam maiores deformações para o mesmo pulso do que os mais duros. Pode-se afirmar que a vibração é muito mais intensa para solos mais moles, pois implicam em deformações muito maiores. Sendo assim pode-se concluir da comparação entre os modelos de solo homogéneo que a ordem de solos que sofrem mais deformação para o que sofre menos é areia fofa, argila mole, argila dura, areia compacta e rocha.

## 4.2 Comportamento de um sistema de solos sobre estrato rochoso

Para a realização dos modelos para casos de sistemas com duas camadas diferentes de solos foi definido que o solo inferior seria um solo mais duro. Neste trabalho, considera-se a rocha como o solo inferior para que garanta o maior número de reflexões possíveis na camada superior.

Adotou-se para o estudo, o solo de argila dura e o solo de areia compacta. Estes solos foram adotados para que as ondas não passassem de um solo mole para um solo completamente duro, o que demandaria muito tempo de simulação e maior desempenho computacional.

Para permitir analisar as mudanças implicadas pela adesão de um estrato rochoso na camada inferior, definiram-se três espessuras de camadas diferentes. Na primeira, a argila dura tem 40 m de espessura e a rocha tem 10 m. Na segunda, o modelo é dividido ao meio e a argila dura tem 25 m e a rocha tem 25 m de espessura. Na terceira, a argila dura tem 10 m e a rocha tem 40 m de espessura. Para o caso da areia compacta, adotou-se o mesmo conceito das três espessuras.

Para todos os modelos realizados neste Ponto é considerado um modelo com uma malha de elementos finitos de 50 m x 50 m, com discretização de 0,2 m e 2500 passos temporais. Considera-se uma carga pontual na superfície, em  $x=25$  m e um recetor na superfície a 15 m de onde está a fonte, em  $x=40$  m. O Quadro 3 apresenta a identificação, espessuras das camadas e a representação para cada modelo apresentado neste Ponto.

Quadro 3 – Identificação dos modelos para o solo heterogéneo de argila dura

Identificação do modelo	Solos	Profundidade	Representação do modelo
		metros	
AD_Ro_10	Argila dura	40	
	Rocha	10	
AD_Ro_25	Argila dura	25	
	Rocha	25	
AD_Ro_40	Argila dura	10	
	Rocha	40	
AC_Ro_10	Areia Compacta	40	
	Rocha	10	
AC_Ro_25	Areia Compacta	25	
	Rocha	25	
AC_Ro_40	Areia Compacta	10	
	Rocha	40	

#### 4.2.1 Argila dura sobre estrato rochoso

Utilizando os parâmetros para cada solo indicado no Quadro 1, realiza-se um estudo onde, na camada superior, encontra-se argila dura e, abaixo, rocha. Este modelo permite analisar as reflexões que surgem devido ao encontro destes solos com características diferentes e como a espessura da camada influencia as reflexões surgidas.

A rocha escolhida para a camada inferior tem por finalidade representar o caso pior entre os solos citados pois é muito rígido e gera maiores reflexões. Como o estudo trata-se de um solo heterogêneo, faz-se uso da camada de amortecimento de maior espessura para garantir o amortecimento completo, nesse caso, a camada de amortecimento para a rocha de 53 m.

##### 4.2.1.1 Argila dura com 40 m de profundidade (AD\_Ro\_10)

O modelo aqui proposto é para a argila dura com espessura de 40 m e rocha de 10 m. A representação deste modelo pode ser vista na Figura 29, onde a carga está representada por uma seta vertical vermelha na superfície, em  $x=25$  m da área de estudo, e o local do recetor por um 'x' verde na superfície, em  $x=40$  m da área de estudo. As cotas estão todas em metros. Aqui, utiliza-se a camada de amortecimento para a rocha, como recomendado.

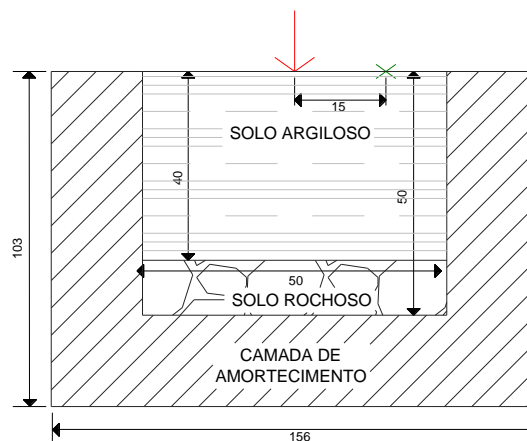


Figura 26- Representação do modelo AD\_Ro\_10 com cotas em metros

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, apresentam-se na Figura 27 as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. Neste modelo percebe-se que a onda leva mais tempo para se propagar completamente devido à profundidade onde se encontra a rocha, e as reflexões que chegam ao recetor são de menor amplitude pois o solo de argila dura as amortece, conforme a onda se propaga. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

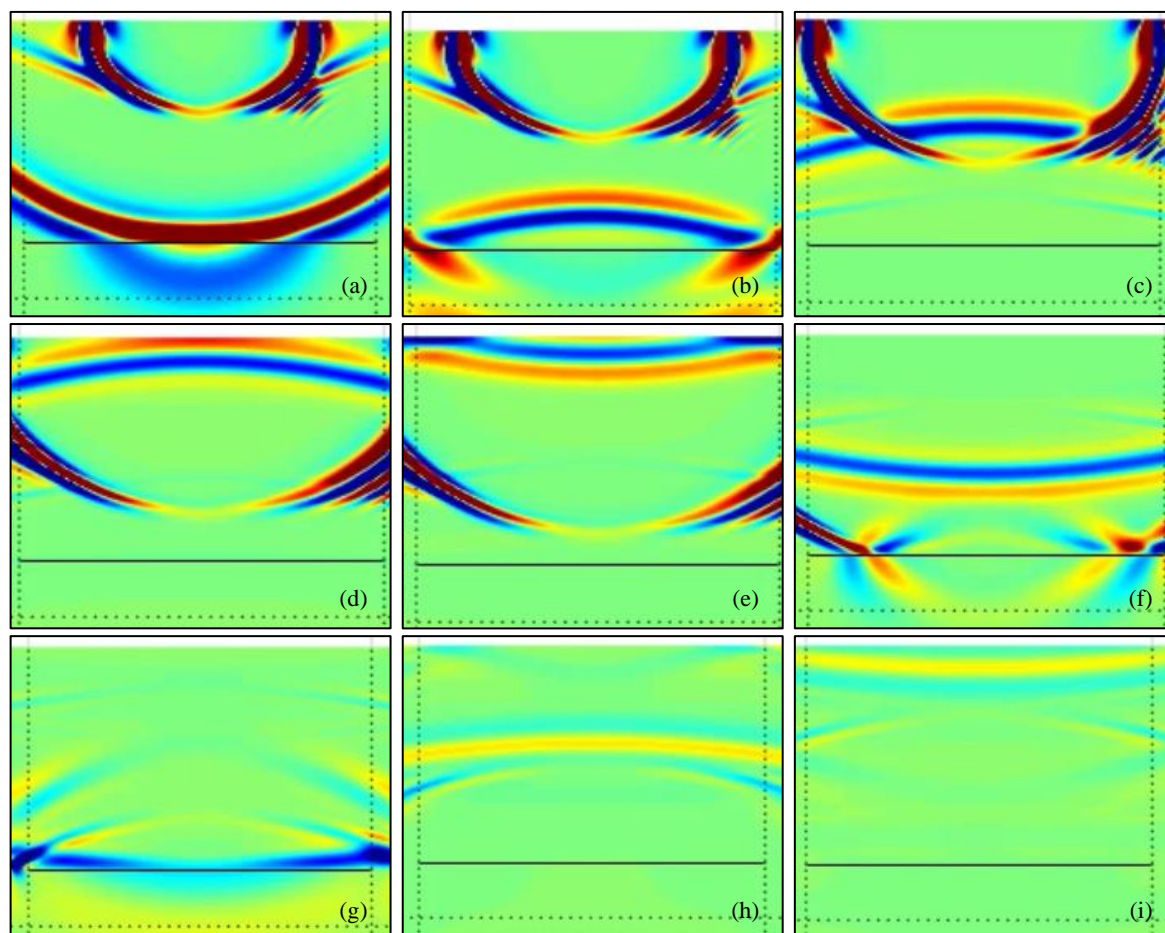


Figura 27 - Propagação da onda para solo heterogéneo de argila dura e rocha com 10 m de profundidade, sendo: (a)=128,9 ms, (b)=147,4 ms, (c)=184,2 ms, (d)=221,0 ms, (e)=239,5 ms, (f)= 294,7 ms, (g)=331,6 ms, (h)=386,8 ms e (i)=442,1 ms

Obtiveram-se os resultados para os deslocamentos no recetor, em x e y. que podem ser observados na Figura 28.



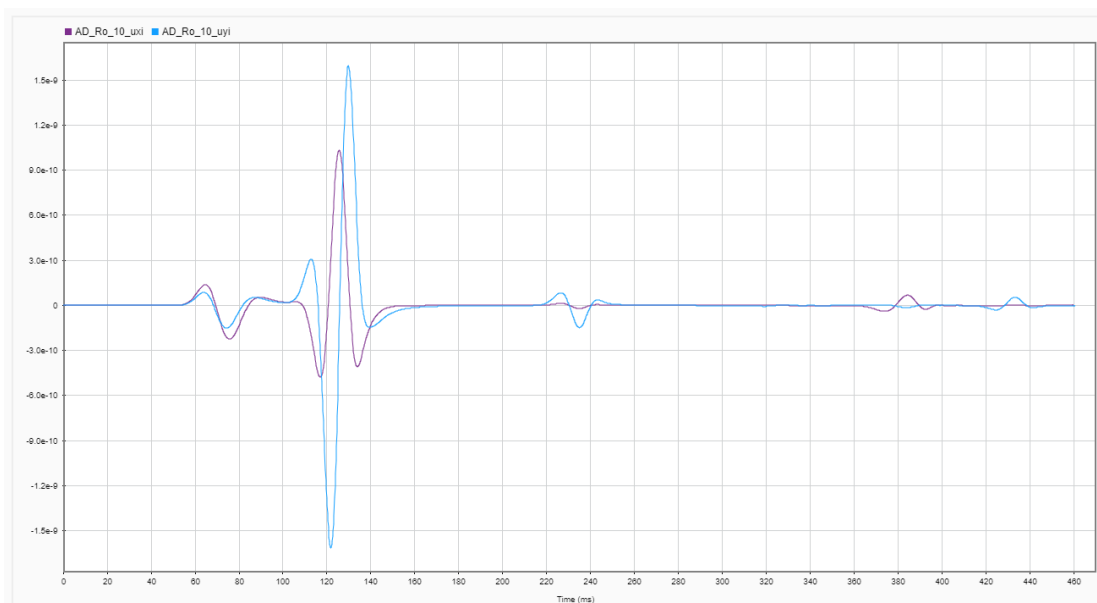


Figura 28 -Deslocamentos para o solo heterogêneo de argila dura e rocha com 10 m de profundidade

Na Figura 28 vê-se claramente o pulso que chega da vibração direta da onda primária e onda secundária do momento 55 a 160 milissegundos, e, em 220 milissegundos pode ser notada a reflexão da onda primária vindo do encontro do solo de rocha, como pode ser notado na Figura 27 (d). Em 360 milissegundos, pode-se observar a reflexão da onda secundária, como visto na Figura 27 (h).

#### 4.2.1.2 Argila dura com 25 m de profundidade (AD\_Ro\_25)

O modelo aqui proposto é para a argila dura com espessura de 25 m e rocha de 25 m. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 29, onde a carga está representada por uma seta vertical vermelha na superfície, em  $x=25$  m, e o local do recetor por um 'x' verde na

superfície, em  $x = 40$  m. As cotas estão todas em metros. Regista-se o a utilização da camada de amortecimento para a rocha, como recomendado.

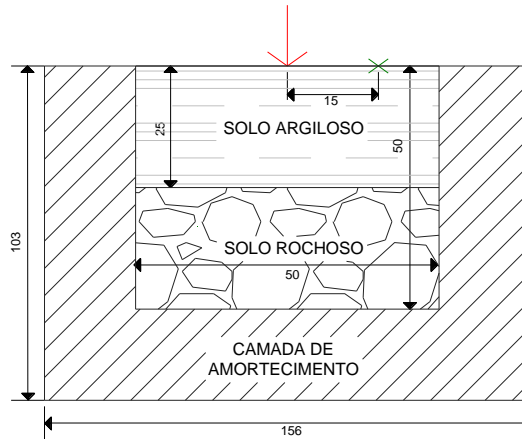


Figura 29- Representação do modelo AD\_Ro\_25 com cotas em metros

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, ilustram-se na Figura 30 as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

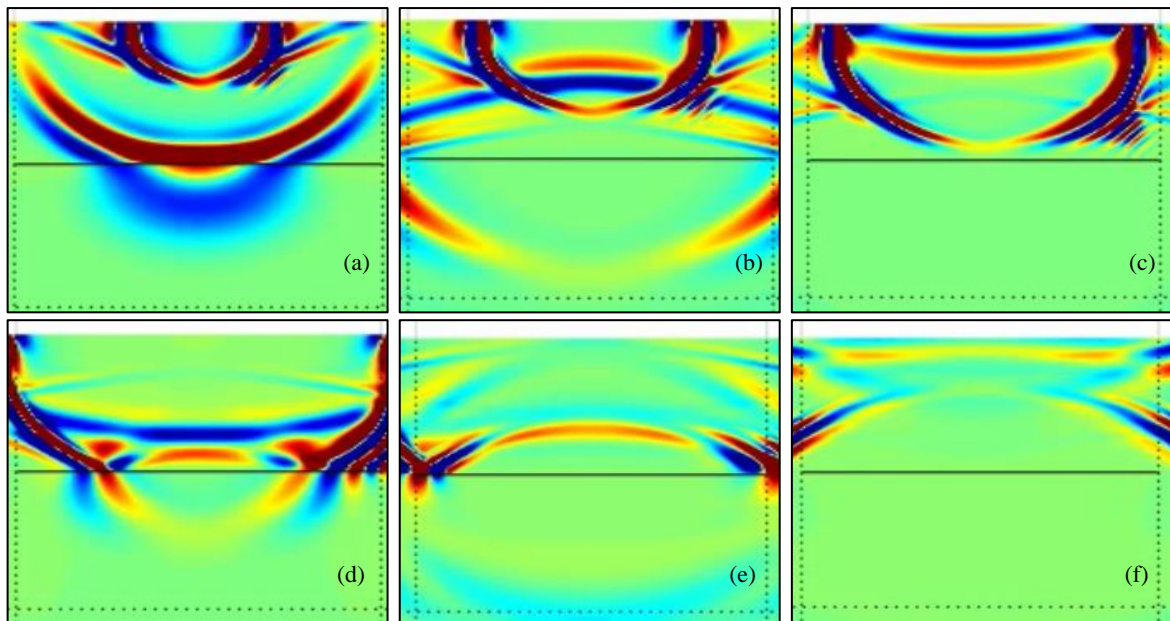


Figura 28 - Propagação da onda para solo heterogêneo de argila dura sobre rocha com 25 m de profundidade, sendo: (a)=92,1 ms, (b)=128,9 ms, (c)=165,8 ms, (d)=202,6 ms, (e)=239,5 ms, (f)= 276,3 ms, (g)=294,7 ms, (h)=350,0 ms e (i)=405,2 ms

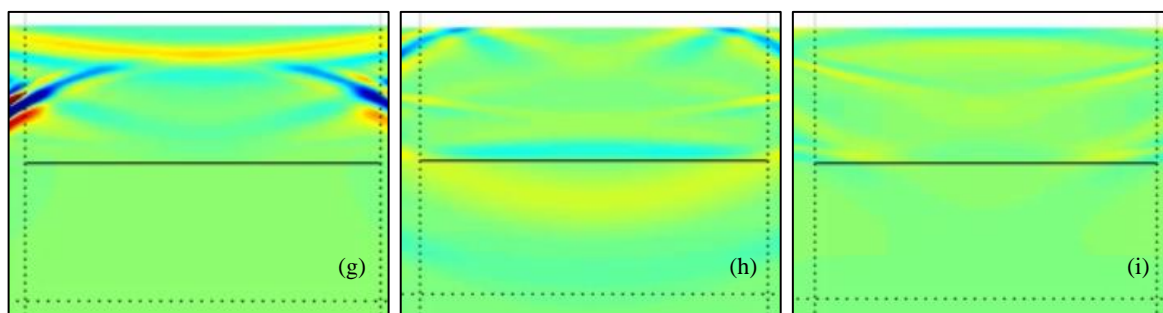


Figura 30- (continuação) Propagação da onda para solo heterogéneo de argila dura sobre rocha com 25 m de profundidade, sendo: (a)=92,1 ms, (b)=128,9 ms, (c)=165,8 ms, (d)=202,6 ms, (e)=239,5 ms, (f)= 276,3 ms, (g)=294,7 ms, (h)=350,0 ms e (i)=405,2 ms

Foram determinados os resultados para os deslocamentos no recetor, em x e y, que pode ser visto na Figura 31.

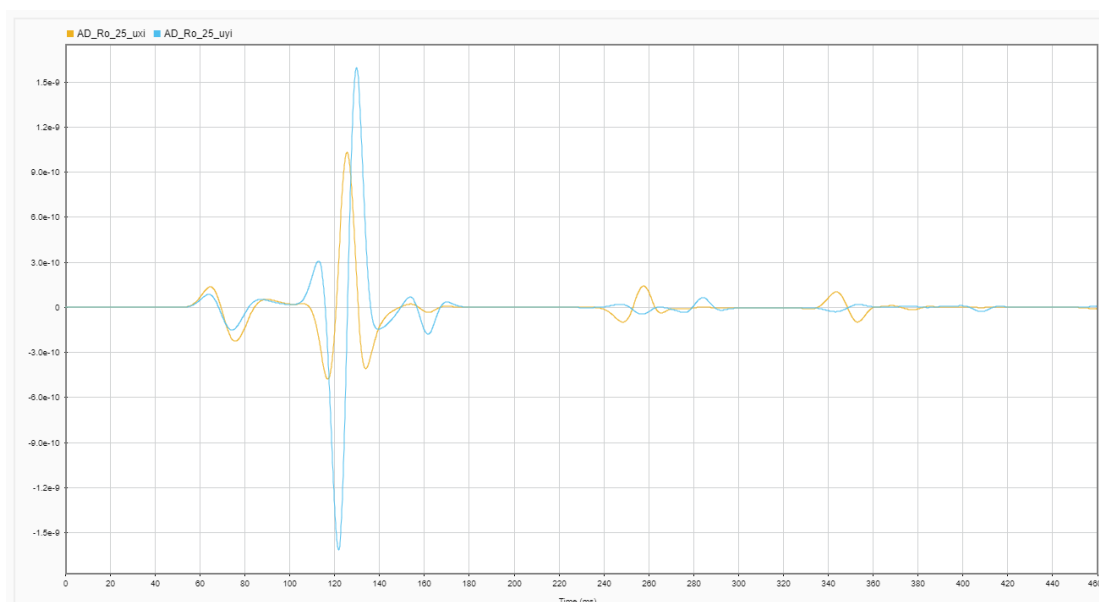


Figura 31 -Deslocamentos para o solo heterogéneo de argila dura e rocha com 25 m de profundidade

É possível comparar a deformação associada somente à vibração vinda diretamente do pulso analisando a Figura 17 que demonstra a vibração para o solo homogéneo de argila dura.

Analisando a Figura 31 é possível notar a vibração direta que chega vinda da onda primária e onda secundária, do momento 60 a 150 ms, e nota-se que nesse ponto, ocorre uma reflexão vinda da onda primária do encontro com o solo de rocha, como pode ser visto na Figura 30 (c) e após este tempo nota-se uma reflexão em 240 ms que está associada à reflexão da onda quando atinge o solo de rocha abaixo, como pode ser visto na Figura 30 (e) e, mais à frente, em 340 ms a reflexão da onda secundária que pode ser vista na Figura 30 (h).

#### 4.2.1.3 Argila dura com 10 m de profundidade (AD\_Ro\_40)

O modelo aqui proposto é para a argila dura com espessura de 10 m e rocha de 40 m. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 32, sendo a carga está representada por uma seta vertical vermelha na superfície, em  $x=25$  m, e o local do recetor por um 'x' verde na superfície, em  $x=40$  m. As cotas estão em metros. Destaca-se a utilização da camada de amortecimento para a rocha, como recomendado.

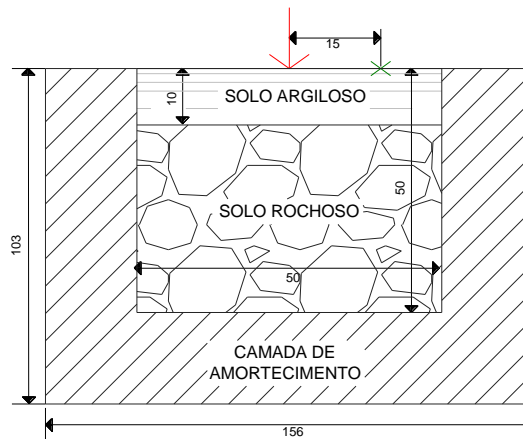


Figura 32- Representação do modelo AD\_Ro\_40 com cotas em metros

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, são apresentados na Figura 33 as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O instante temporal correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

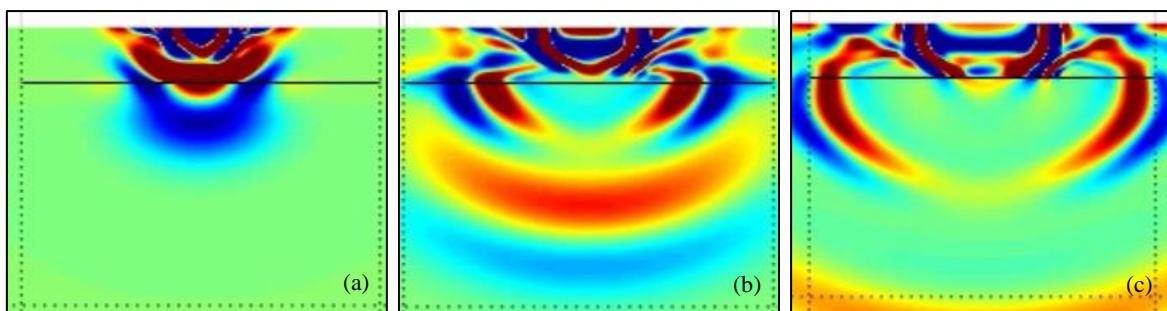


Figura 31 - Propagação da onda para solo heterogêneo de argila dura e rocha com 10 m de profundidade, sendo: (a)=55,3 ms, (b)=73,7 ms, (c)=92,1 ms, (d)=110,5 ms, (e)=147,4 ms e (f)= 202,6 ms

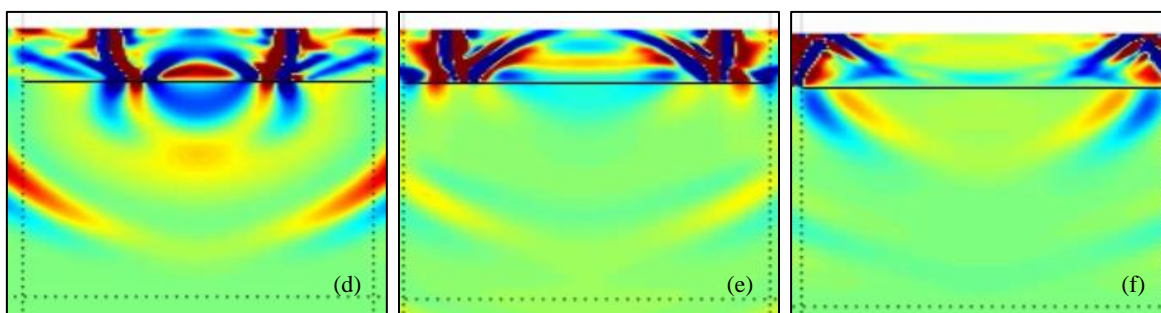


Figura 33 – (continuação) Propagação da onda para solo heterogéneo de argila dura e rocha com 10 m de profundidade, sendo: (a)=55,3 ms, (b)=73,7 ms, (c)=92,1 ms, (d)=110,5 ms, (e)=147,4 ms e (f)= 202,6 ms

Determinaram-se os resultados para os deslocamentos no recetor, em x e y. Que pode ser visto na Figura 34.

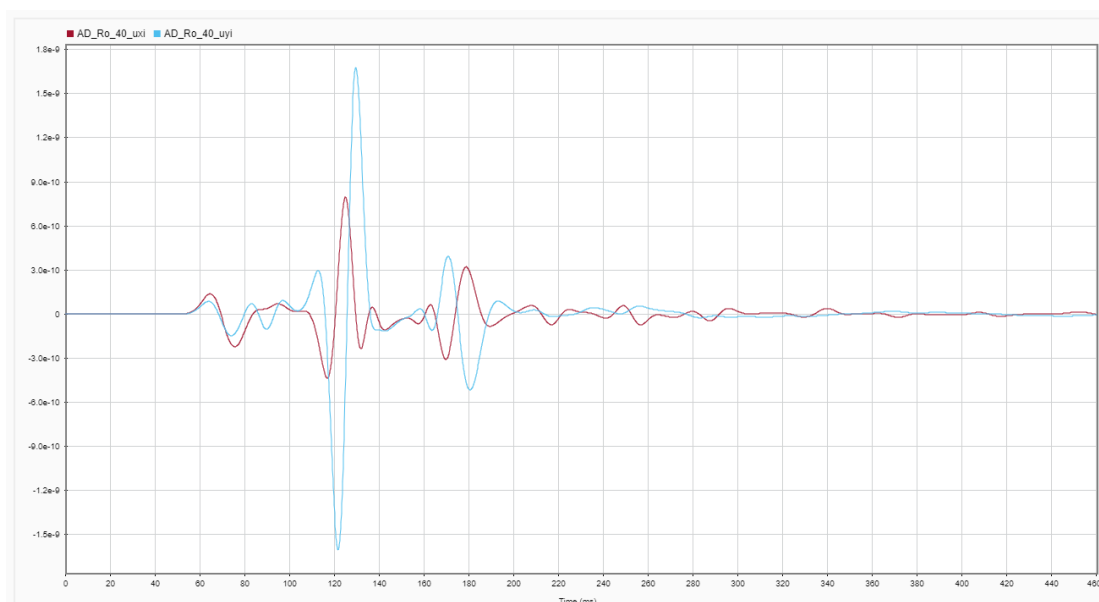


Figura 34 -Deslocamentos para o solo heterogéneo de argila dura e rocha com 40 m de profundidade

Nota-se na Figura 34, que para a camada de argila dura de 10 m de profundidade (AD\_Ro\_40), existe uma maior quantidade de reflexões tanto para x quanto para y, como pode ser visto Figura 33 (b) em que as reflexões acontecem rapidamente e que a partir desse momento acontecem muitas reflexões sendo difícil separá-las, o que é devido a onda primária e secundária e outras.

O que pode-se afirmar é que em torno de 50 ms e 90 ms, chega a onda primária, já no final com alguma influência de reflexões, como pode ser visto na Figura 33 (c). Em torno de 110 ms e 150 ms chega a onda secundária que tem uma intensidade muito superior às outras, como pode ser visto na Figura 33 (d).

A comparação dos deslocamentos no tempo para x e y, entre os três modelos com profundidades de argila dura diferentes, podem ser encontradas nas Figura A9 e A10 do Anexo.

#### 4.2.2 Areia compacta sobre estrato rochoso

Utilizando os parâmetros para cada solo indicado no Quadro 1, realiza-se um estudo onde na camada superior encontra-se areia compacta e abaixo rocha. A areia compacta é considerada mais dura do que a argila dura, então espera-se encontrar resultados similares aos encontrados anteriormente, mas com intensidades inferiores. O modelo permite analisar as reflexões que surgem devido ao encontro destes solos com características diferentes e como a espessura da camada influencia nas reflexões surgidas.

A rocha escolhida para a camada inferior representa o pior caso entre os solos citados pois é muito rígido e gera maiores reflexões. Como o estudo trata-se de um solo heterogêneo faz-se uso da camada de amortecimento de maior espessura para garantir o amortecimento completo, nesse caso, o amortecimento para a rocha de 53 m.

##### 4.2.2.1 Areia compacta com 40 m de profundidade (AC\_Ro\_10)

O modelo proposto neste Ponto é para a areia compacta com espessura de 40 m e rocha de 10 m. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 35. Onde a carga está representada por uma seta vertical vermelha na superfície, em  $x=25$  m, e o local do recetor por um 'x' verde na superfície, em  $x=40$  m. As cotas todas estão em metros. Aqui, utiliza-se a camada de amortecimento para a rocha, como recomendado.

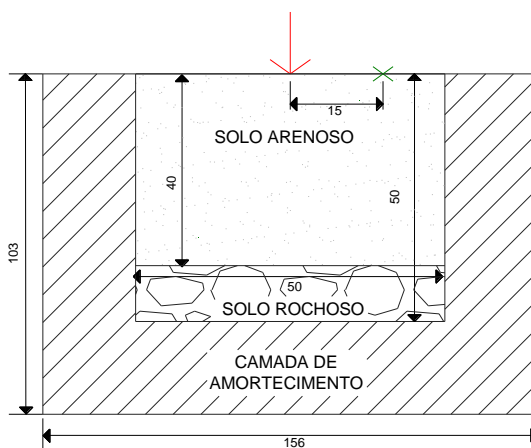


Figura 35- Representação do modelo AC\_Ro\_10 com cotas em metros

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, é representado na Figura 36 as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. Neste modelo percebe-se que a onda leva mais tempo para ser transmitida completamente devido a profundidade onde

se encontra a rocha, e as reflexões que chegam ao recetor são de menores intensidades pois o solo de argila dura as amortece conforme a onda é transmitida. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

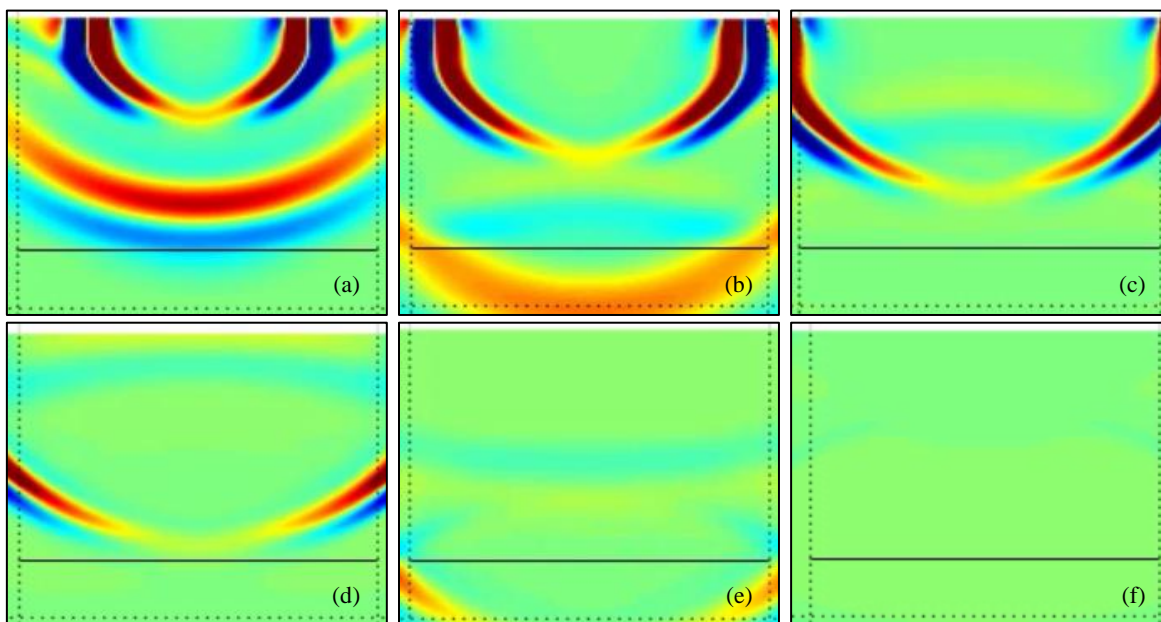


Figura 36 - Propagação da onda para solo heterogéneo de areia compacta e rocha com 40 m de profundidade, sendo: (a)=73,7 ms, (b)=92,1 ms, (c)=110,5 ms, (d)=128,9 ms, (e)=165,8 ms e (f)= 202,6 ms

E obteve-se os resultados para os deslocamentos no recetor, em x e y. Que pode ser visto na Figura 37.

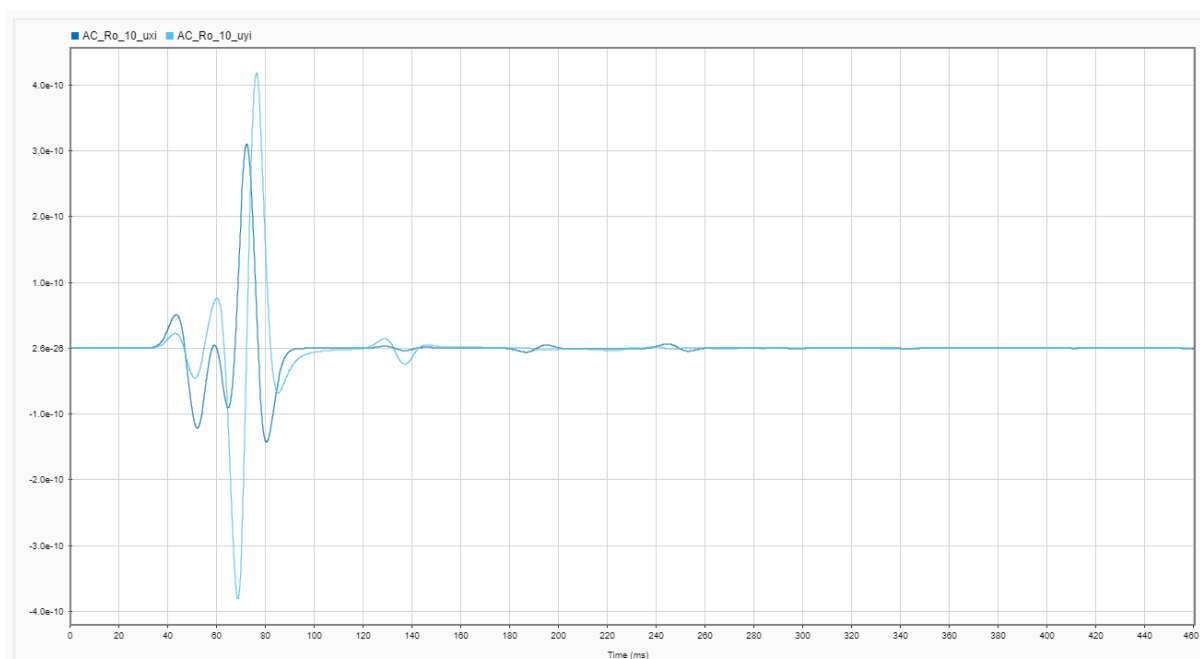


Figura 37 -Deslocamentos para o solo heterogêneo de areia compacta e rocha com 40 m de profundidade

Na Figura 37 é possível notar claramente as vibrações diretas de 30 ms até 110 ms, facto que pode ser observado ao comparar o pulso encontrado aqui com o da Figura 17, para o solo homogêneo de areia compacta. Em 120 ms uma reflexão que pode ser vista na Figura 36 (d) vinda da onda primária. E mais duas reflexões com menor intensidade em 180 ms e 240 ms que podem ser notadas nas Figura 36 (h) e (i), respetivamente.

#### 4.2.2.2 Areia compacta com 25 m de profundidade (AC\_Ro\_25)

O modelo aqui proposto é para a areia compacta com espessura de 25 m e rocha de 25 m. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 38. Onde a carga está representada por uma seta vertical vermelha na superfície, em  $x=25$  m, e o local do recetor por um 'x' verde na superfície, em  $x=40$  m. As cotas todas estão em metros. Nota-se a utilização da camada de amortecimento para a rocha, como recomendado.



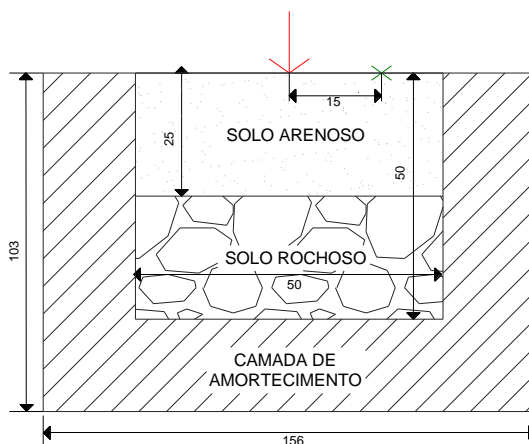


Figura 38-Representação do modelo AC\_Ro\_25 com cotas em metros.

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, é demonstrado na Figura 39 as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

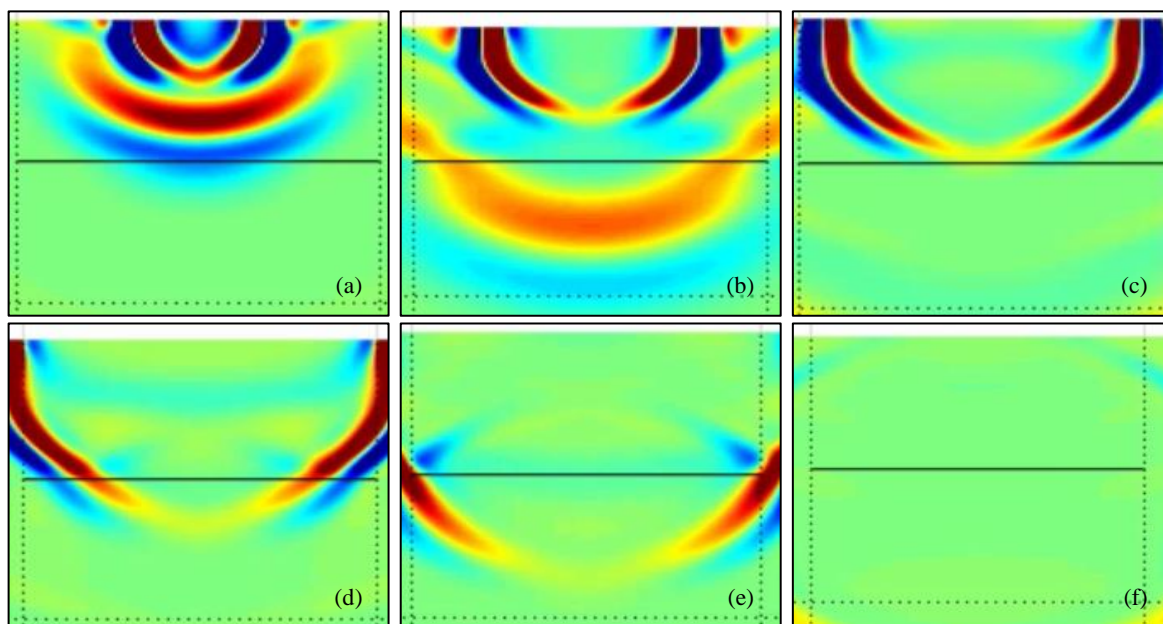


Figura 39 - Propagação da onda para solo heterogêneo de areia compacta e rocha com 25 m de profundidade, sendo: (a)=55,3 ms, (b)=73,7 ms, (c)=92,1 ms, (d)=110,5 ms, (e)=128,9 ms e (f)= 165,8 ms

E obteve-se os resultados para os deslocamentos no recetor, em x e y. Que pode ser visto na Figura 40.

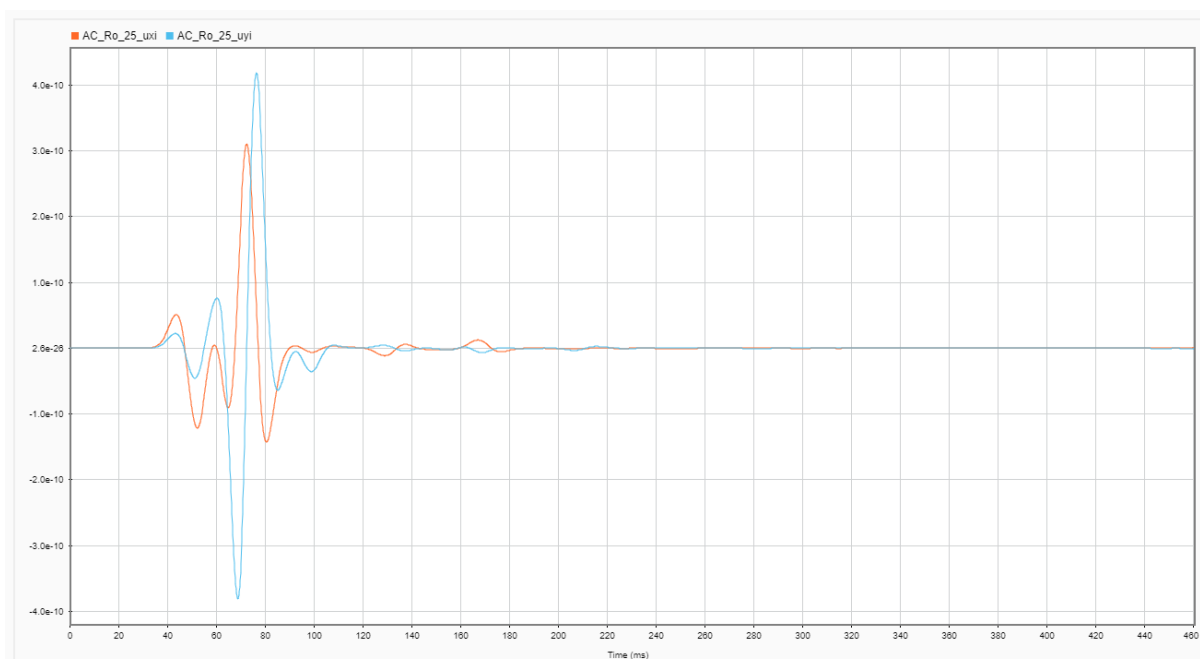


Figura 40 -Deslocamentos para o solo heterogêneo de areia compacta e rocha com 25 m de profundidade

Analisando a Figura 40 nota-se que a reflexão aparece rapidamente logo depois que acaba a vibração direta do pulso que vai de aproximadamente 35 a 90 milissegundos, a reflexão da onda primária pode ser vista em 90 ms e depois em 160 ms da onda secundária, que podem ser vista na Figura 39 (c) e (f), respetivamente. Após não se nota a presença de quaisquer outras vibrações significativas, a diferença quando comparado os modelos de areia compacta para os modelos de argila dura podem ser explicadas pelo facto de as velocidades de ondas serem bem superiores para a areia compacta.

A alta velocidade de propagação da onda faz com que as ondas refletidas atinjam o recetor mais rapidamente e depois sofram um amortecimento maior. Pelo facto de a areia compacta ser mais dura pode-se notar que a deformação para a areia compacta é muito menor que para a argila dura.

#### 4.2.2.3 Areia compacta com 10 m de profundidade (AC\_Ro\_40)

O modelo aqui proposto é para a areia compacta com espessura de 10 m e rocha de 40 m. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 41. Onde a carga está representada por uma seta vertical vermelha na superfície, em  $x = 25$  m, e o local do recetor por um 'x' verde na

superfície, em  $x = 40$  m. As cotas todas estão em metros. Nota-se o a utilização da camada de amortecimento para a rocha, como recomendado.

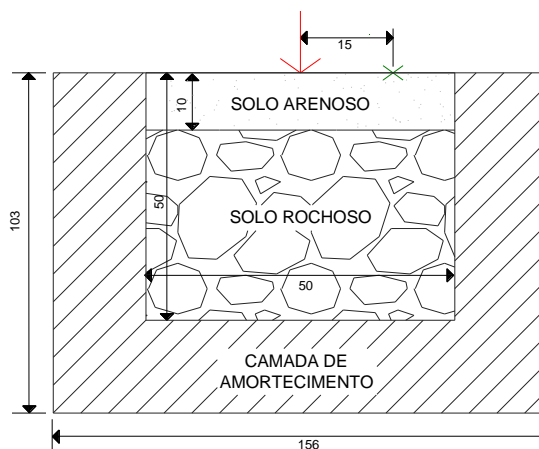


Figura 41-Representação do modelo AC\_Ro\_40 com cotas em metros

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, é demonstrado na Figura 42 as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

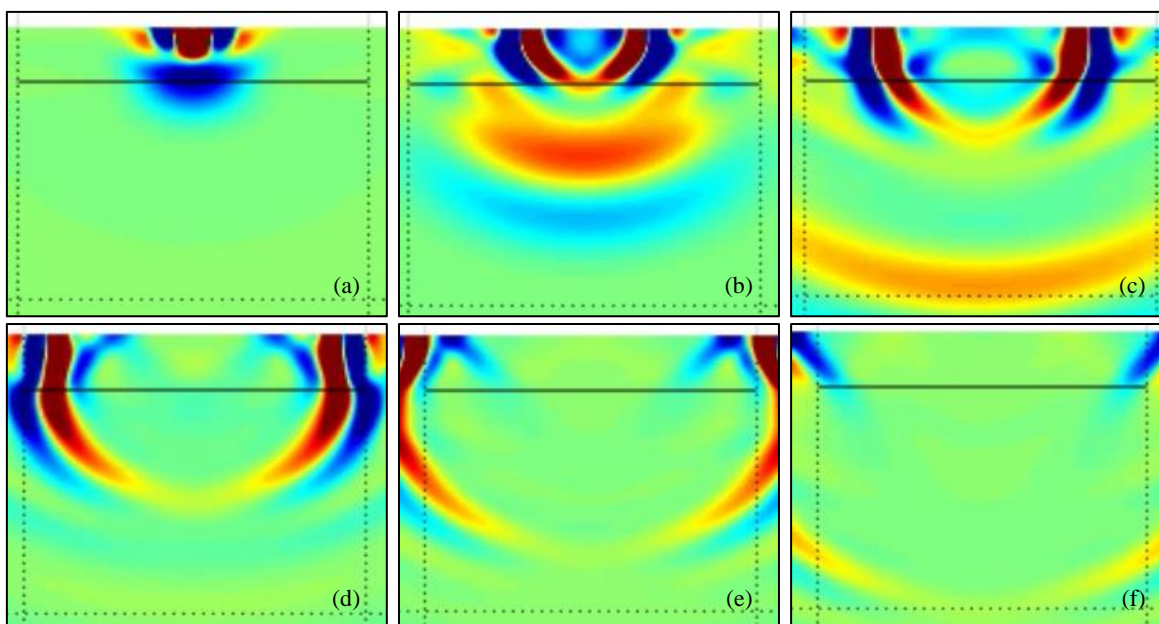


Figura 42 - Propagação da onda para solo heterogêneo de areia compacta e rocha com 10 m de profundidade, sendo: (a)=36,8 ms, (b)=55,3 ms, (c)=73,7 ms, (d)=92,1 ms, (e)=110,5 ms e (f)= 128,9 ms

E obteve-se os resultados para os deslocamentos no recetor, em  $x$  e  $y$ . Que pode ser visto na Figura 43.

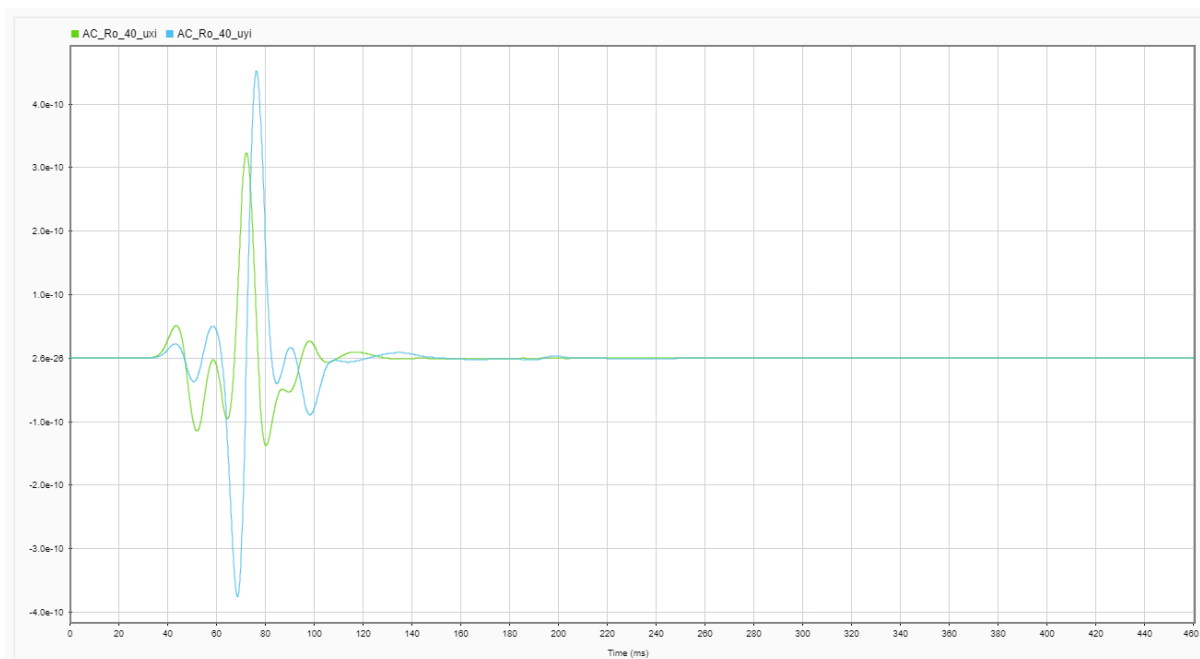


Figura 43 -Deslocamentos para o solo heterogêneo de areia compacta e rocha com 10 m de profundidade

Analisando a Figura 43 pode-se notar que quando comparado com o modelo de argila dura, demonstrado na Figura 34, apresenta uma quantidade muito menor de reflexões. Sabe-se que a velocidade da onda primária para a areia compacta (770,60 m/s) é bem maior que a da argila dura (400,89m/s), logo, a onda é transmitida mais rapidamente.

Pode-se notar que nos 90 ms, após o recetor receber o pulso, recebe uma reflexão logo em seguida, como demonstrado na Figura 43 e na Figura 42 (d). Depois, pode-se notar uma pequena alteração no momento de 200 ms, que se pode associar ao facto de a reflexão que atingiu o recetor ( $x=40$ ) foi muito baixa. Concluindo que a maior parte das reflexões que atingem o recetor, chegam logo no final da onda secundária.

A comparação dos deslocamentos no tempo para x e y, entre os três modelos com profundidades de argila dura diferentes, podem ser encontradas nas Figura A11 e A12 do Anexo.

### 4.3 Comportamento de uma estrutura de túnel inserida em um solo

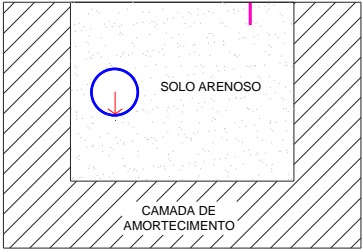
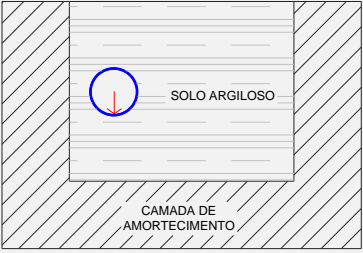


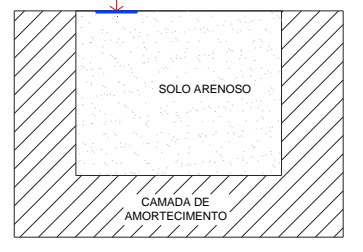

Neste Ponto procura-se analisar quais os diferentes comportamentos de propagação da vibração para um solo homogêneo quando é inserido uma estrutura de túnel, com uma carga pontual vertical na soleira, e qual a eficiência dos métodos mitigatórios adotados. Para os próximos

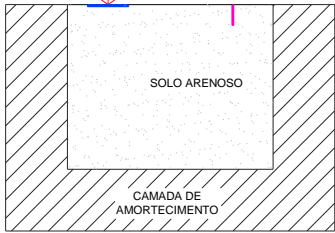
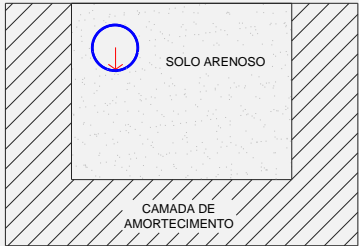
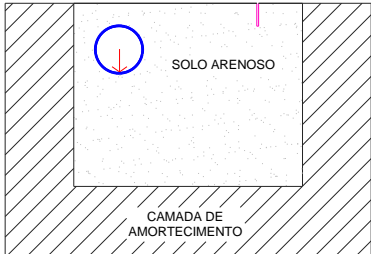
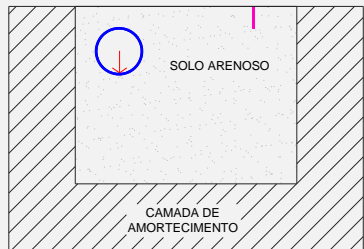
Pontos, são considerados recetores na superfície ao longo dos 50 m do modelo, deixando de ser a análise somente para um recetor, como era feito nos Pontos anteriores.

Para auxiliar a compreensão dos modelos é apresentado o Quadro 4, que apresenta a identificação, quais as influências avaliadas e a representação para cada modelo.

Quadro 4 - Identificação dos modelos analisados com túnel

Ponto		Identificação do modelo	Solo	Influência	Representação do modelo
4.3.1	4.3.1.1	AC_sT	Areia Compacta	Solo homogéneo	
	4.3.1.2	AC_T_AC		Furo do túnel	
	4.3.1.3	AC_T_B		Túnel com anel em betão	
4.3.2	4.3.2.1	AC_T_B_TrV_3	Areia Compacta	Trincheira vazia de 3 m	
	4.3.2.2	AC_T_B_TrV_5		Trincheira vazia de 5 m	

4.3.3	4.3.3.1	AC_T_B_PE_5	Areia Compacta	Parede enterrada de 5 m	
4.3.4	4.3.4.1	AD_T_B	Argila Dura	Solo de argila dura	
	4.3.4.2	AD_T_B_TrV_5		Solo de argila dura com trincheira vazia de 5 m	
	4.3.4.3	AD_T_B_PE_5		Solo de argila dura com parede enterrada de 5 m	
4.3.5	4.3.5.1	AC_Sup_B	Areia Compacta	Carga na superfície sobre placa em betão	
	4.3.5.2	AC_Sup_B_TrV_5		Carga na superfície sobre placa em betão com trincheira vazia de 5 m	

	4.3.5.3	AC_Sup_B_PE_5		Carga na superfície sobre placa em betão com parede enterrada de 5 m	
4.3.6	4.3.6.1	AC_T2_B	Areia Compacta	Túnel em menor profundida	
	4.3.6.2	AC_T2_B_TrV_5		Túnel em menor profundida com trincheira vazia de 5 m	
	4.3.6.3	AC_T2_B_PE_5		Túnel em menor profundida com parede enterrada de 5 m	

Para melhor compreender o comportamento da propagação das ondas e como cada alteração no modelo influencia na propagação, decidiu-se analisar os níveis de vibrações que chegam em cada recetor ao longo da superfície. Para tanto programou-se as Equações (15) e (16) para que, a partir dessas, se obter um gráfico do nível de vibração para cada recetor.

A Equação (15), fornece os maiores níveis de vibrações a partir dos maiores deslocamentos detetadas em cada recetor. A Equação (16), fornece o integral dos níveis de vibrações a partir da soma de todos os deslocamentos sofridos em cada recetor, que dá uma ideia do equivalente de energia total recebida em cada recetor. Os resultados dos níveis de vibrações são dados em dB com referência de deslocamento de 1mm.

$$\text{Nível de vibração máx.} = 20 * \log_{10} \left( \frac{\max|\text{deslocamento}|}{10^{-3}} \right) \quad (15)$$

$$Int. do nível de vibração = 20 * \log_{10} \left( \Delta t * \frac{\sum |deslocamento em cada passo|}{10^{-3}} \right) \quad (16)$$

Para todos os modelos realizados neste Ponto é considerado um modelo de 50 m de largura por 40 m de altura, com discretização de 0,25 m e 15000 passos temporais. Com uma carga pontual vertical na soleira de onde estaria o túnel ou na superfície acima de uma placa de betão.

#### 4.3.1 Comportamento da estrutura do túnel inserida em um solo de areia compacta

Os modelos avaliados neste Ponto têm por finalidade demonstrar as alterações de comportamento da onda quando incluído um furo e depois incluída a estrutura do túnel com anel em betão. É considerada uma carga pontual em  $x=10$  m e  $y=15$  m, sendo esse o local onde ficará a soleira do túnel. A camada de amortecimento escolhida é a recomendada no Ponto 3.4, de 20 m para a areia compacta.

##### 4.3.1.1 Solo homogéneo de areia compacta sem túnel (AC\_sT)

O modelo proposto neste Ponto é a base para comparação de um solo homogéneo de areia compacta sem qualquer estrutura de túnel ou obstáculo e com recetores ao longo de toda a superfície. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 44.

A carga está representada por uma seta vertical vermelha na soleira onde ficaria o túnel,  $x=10$  m e  $y=15$  m. As cotas estão em metros.

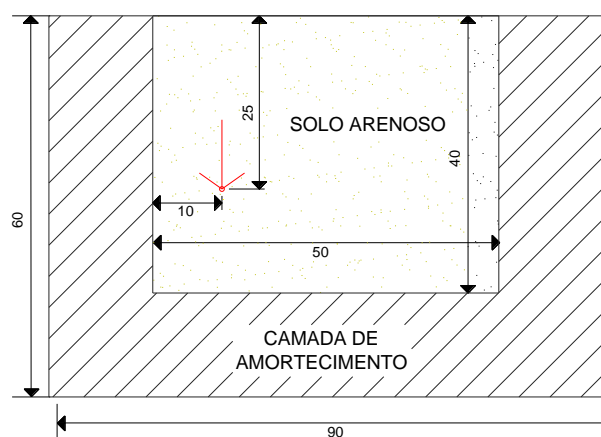


Figura 44- Representação do modelo AC\_sT, com cotas em metros

Pode-se visualizar os deslocamentos em cada recetor da superfície ao longo do tempo, na Figura 45. A amplitude é marcada pela intensidade com qual a linha é apresentada para  $x$  e para  $y$ .



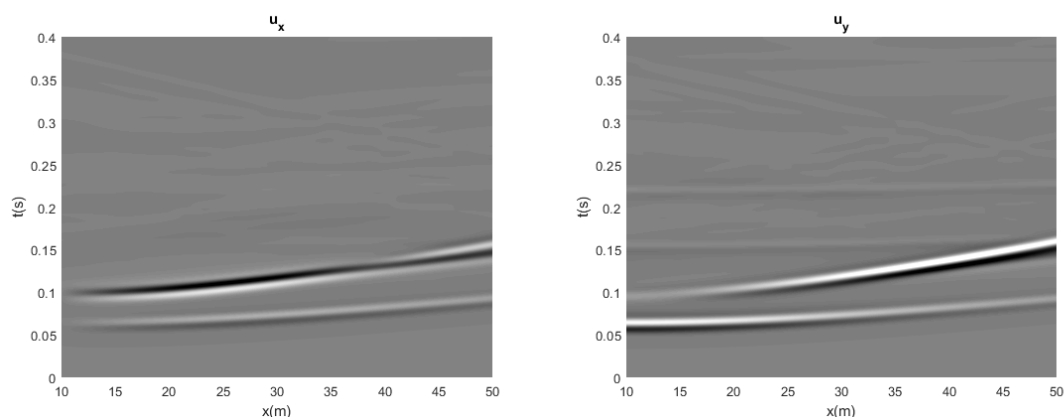


Figura 45 – Deslocamentos calculados para AC\_sT

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, são apresentadas na, Figura 46, as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

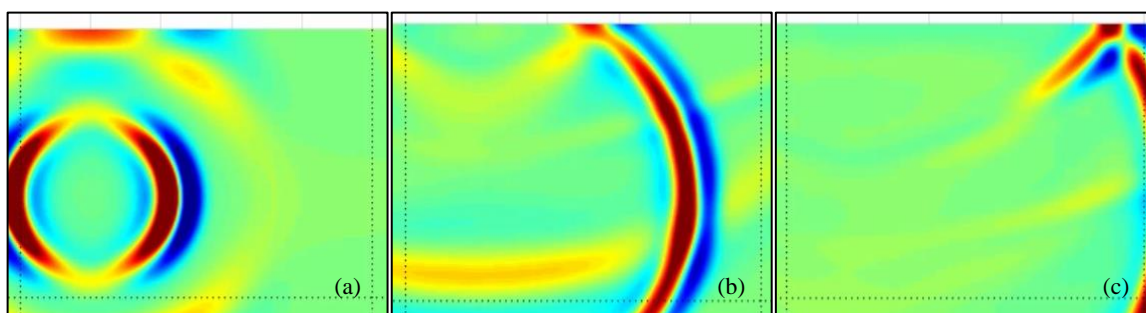


Figura 46- Propagação da onda para solo homogéneo de areia compacta sem estrutura do túnel, sendo: (a)=62,3 ms, (b)=112,1 ms e (c)=149,4 ms.

Analisando a Figura 45 nota-se claramente a onda primária e a onda secundária quando essas chegam à superfície pois são as mais intensamente marcadas e que não ocorre quaisquer vibrações por reflexões, como pode ser visto na Figura 46.

#### 4.3.1.2 Solo homogéneo de areia compacta com o furo do túnel (AC\_T\_AC)

O modelo proposto neste Ponto é para um solo homogéneo de areia compacta com um furo aberto onde ficará a estrutura do túnel e com recetores ao longo de toda a superfície. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 47.

A carga está representada por uma seta vertical vermelha na soleira do furo, em  $x=10$  m e  $y=15$  m. O furo está a 20 m de profundidade da superfície ao centro do túnel e tem diâmetro de 10 m. As cotas estão em metros.

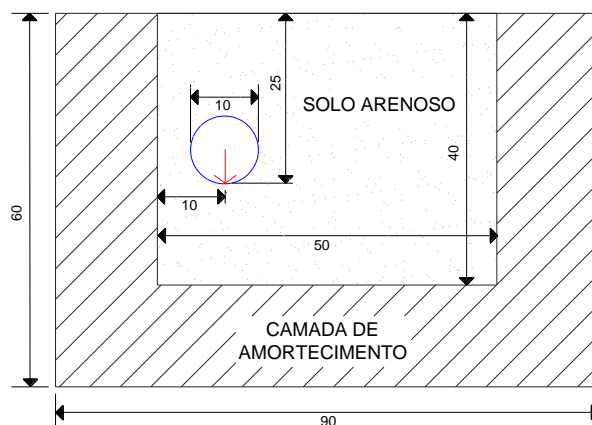


Figura 47 - Representação do modelo AC\_T\_AC com cotas em metros

Pode-se visualizar os deslocamentos em cada recetor na superfície pelo tempo, na Figura 48. A amplitude é marcada pela intensidade com qual a linha é apresentada para x e para y.

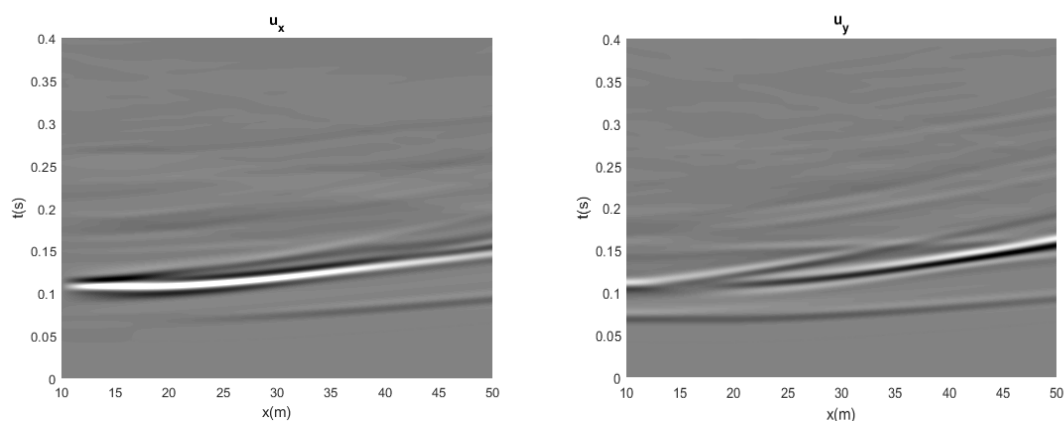


Figura 48– Deslocamentos calculados para AC\_T\_AC

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, são apresentadas, na Figura 49, as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

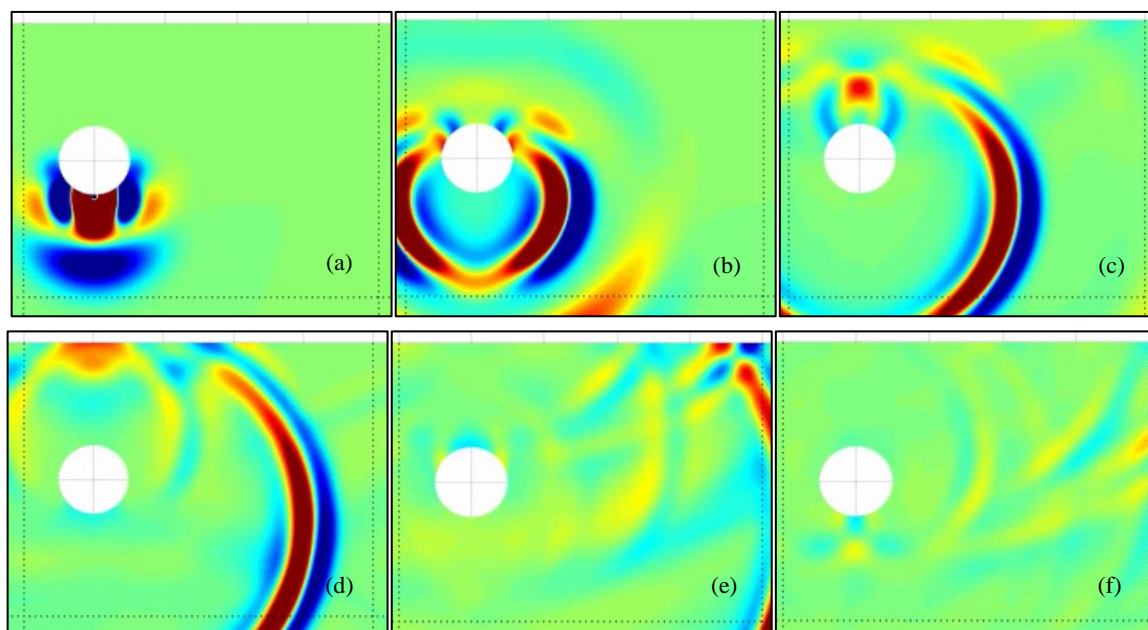


Figura 49- Propagação da onda para solo homogéneo de areia compacta com o furo do túnel, sendo: (a)=38,1 ms, (b)=63,4 ms, (c)=88,8 ms, (d)=114,2 ms, (e)=139,5 ms e (f)= 190.3 ms

Na Figura 48 pode-se notar a onda primária no tempo de 0,05 s até quase 0,1 s e a onda secundária mais acima, melhor demarcada devido a maior intensidade dessa, que pode ser vista na Figura 49 (d). Quando comparado com a Figura 45, observa-se que a intensidade diminui em relação ao anterior e, ao analisar a Figura 48 para  $u_y$ , principalmente, em  $x=15$  m, é possível notar uma bifurcação que é associada ao furo do túnel, o que pode ser demonstrado na Figura 49 (c).

#### 4.3.1.3 Solo homogéneo de areia compacta com túnel de anel em betão (AC\_T\_B)

O modelo proposto neste Ponto é para um solo homogéneo de areia compacta com a estrutura de um túnel e com recetores ao longo de toda a superfície. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 50.

A carga está representada por uma seta vertical vermelha na soleira da estrutura do túnel, em  $x=10$  m e  $y=15$  m. O túnel está a 20 m de profundidade da superfície ao centro do túnel. O furo tem diâmetro de 10 m e o anel tem espessura de 0,375 m. O anel é em betão e para este material foi considerado módulo de elasticidade igual a 30 GPa, coeficiente de Poisson de 0,15 e massa volúmica igual a 2500 kg/m<sup>3</sup>, como indicado no Quadro 1. As cotas estão em metros.

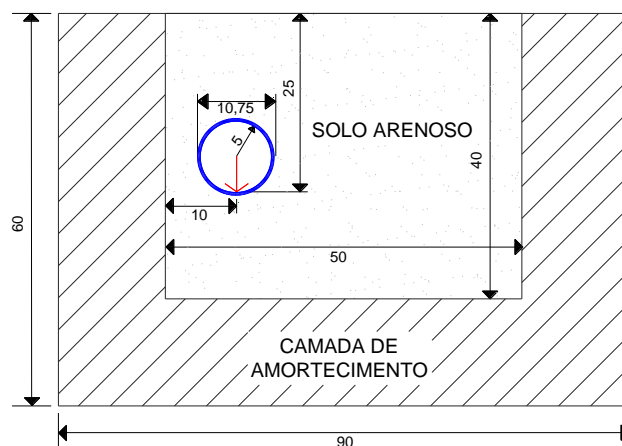


Figura 50- Representação do modelo AC\_T\_B, com cotas em metros

Podem-se visualizar os deslocamentos em cada recetor na superfície pelo tempo na Figura 51. A amplitude é marcada pela intensidade com qual a linha é apresentada para x e para y.

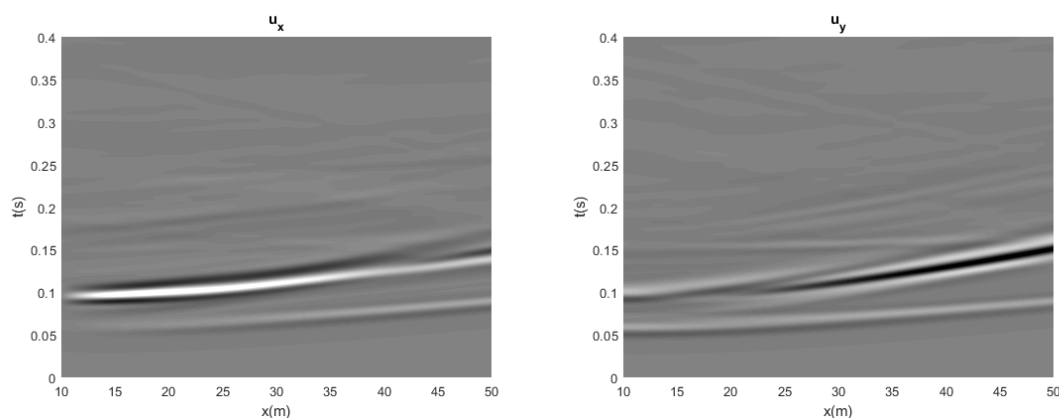


Figura 51– Deslocamentos calculados para AC\_T\_B

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, são ilustradas, na Figura 52, as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

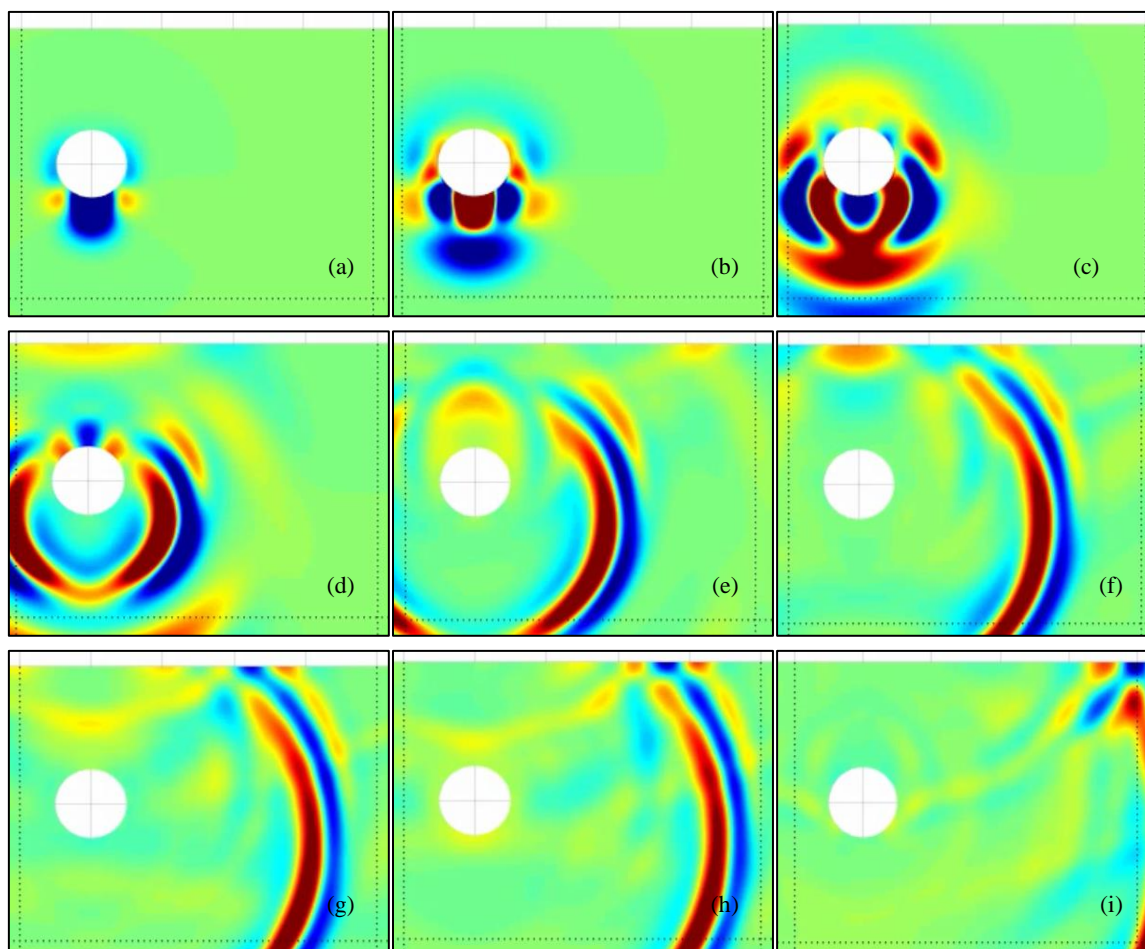


Figura 52- Propagação da onda para solo homogêneo de areia compacta com estrutura do túnel e anel em betão, sendo: (a)=27,4 ms, (b)= 35,6 ms , (c)= 46,5 ms, (d)=60,2 ms, (e)=79,3 ms, (f)=101,2 ms, (g)=117,7 ms, (h)=123,1 ms e (i)=153,2 ms

Ao comparar a Figura 51 com a Figura 48 nota-se uma diferença muito pequena associada apenas ao tempo menor e uma leve diminuição da intensidade das ondas que chegam à superfície, o que se deve ao facto de a estrutura de betão do anel ser mais rígida e as ondas se propagarem mais rápido e serem amortecidas; porém esse amortecimento é muito baixo devido à espessura do anel ser fina de 0,375 m.

#### 4.3.1.4 Níveis de vibrações máximos

Como referido anteriormente, no Ponto 4.3, é realizada a análise para os níveis de vibrações máximos em cada recetor.

Os níveis de vibrações máximos ao longo do tempo para cada recetor na superfície demonstram de forma fácil quais foram os locais que tiveram maior nível de vibração em relação ao deslocamento. A análise das regiões com níveis mais críticos permitem a previsão para quais

locais os métodos de mitigação serão mais requisitados. Os níveis para os modelos anteriores realizados estão representados nas Figura 53 e Figura 54. A Figura 53 demonstra os níveis máximos para a coordenada x e a Figura 54 demonstra os níveis máximos para a coordenada y.

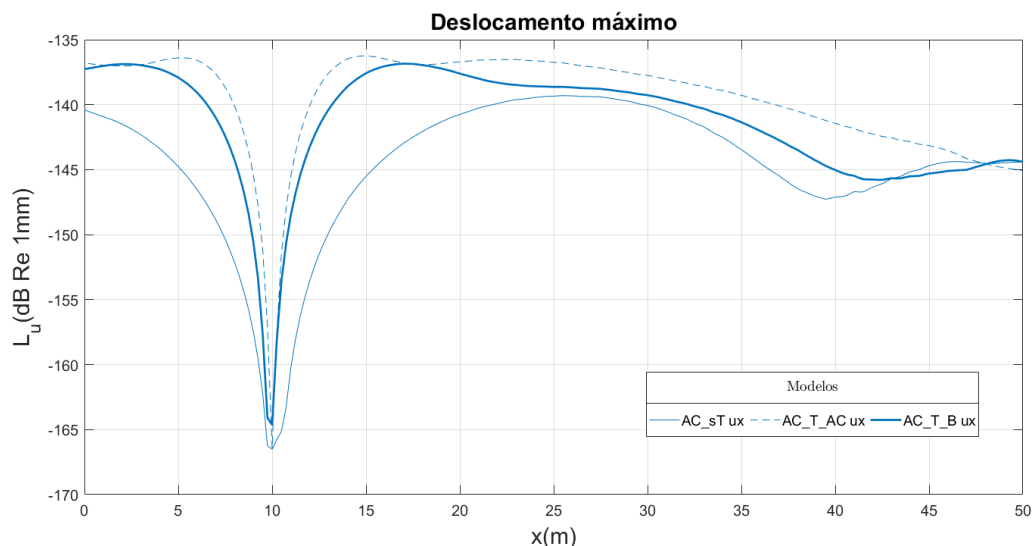


Figura 53 - Níveis de deslocamento máximo para a influência do túnel em x

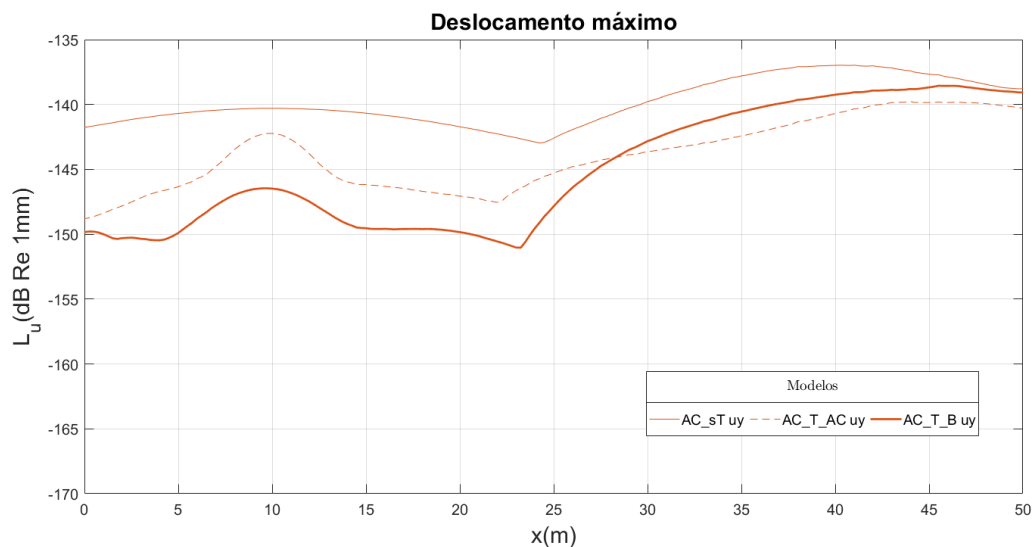


Figura 54 - Níveis de deslocamento máximo para a influência do túnel em y

Na Figura 53 nota-se que onde está a carga ( $x=10$  m e  $y=15$  m) existe uma queda significativa, associada ao facto de naquele ponto na superfície ser o lugar com menor deslocamento horizontal por ser o local logo acima da carga. Já na Figura 54, se pode notar que em  $x=10$  m o deslocamento vertical não é baixo, que se deve ao facto de ser uma carga pontual vertical. Essa característica será vista em todos os próximos casos de estudos e todas são associadas ao mesmo motivo aqui descrito.

Uma característica muito evidente entre os modelos, possível de notar na Figura 54, é que em  $x=10$  m ao adicionar a estrutura do túnel percebe-se um pico significativo que tem um deslocamento menor que o modelo sem o túnel e quando acrescentado o Betão no anel (AC\_T\_B) o deslocamento máximo acima da região do túnel ( $x=5$  a  $x=15$  m) tem o menor deslocamento. Enfatizando o que foi descrito anteriormente que o betão amortece parte da vibração recebida e os três modelos começam a assumir certa semelhança de comportamento em  $x=25$  tanto para  $x$  quanto para  $y$ .

#### 4.3.1.5 Integral dos níveis de vibrações

Como referido anteriormente, no Ponto 4.3, é realizada a análise para o integral dos níveis de vibrações em cada recetor. O integral dos níveis de vibrações ao longo do tempo para cada recetor na superfície demonstra de forma fácil quais foram os locais que receberam ao longo do tempo maior número de ondas, sejam essas de forma direta ou por reflexão.

Ressalta-se que a análise das regiões com níveis mais críticos permitem a previsão para quais locais sofrem mais reflexões e sentem mais a vibração ao longo do tempo. Os níveis para os modelos anteriores realizados estão representados nas Figura 55 e Figura 56. A Figura 55 demonstra os níveis máximos para a coordenada  $x$  e a Figura 56 demonstra os níveis máximos para a coordenada  $y$ .

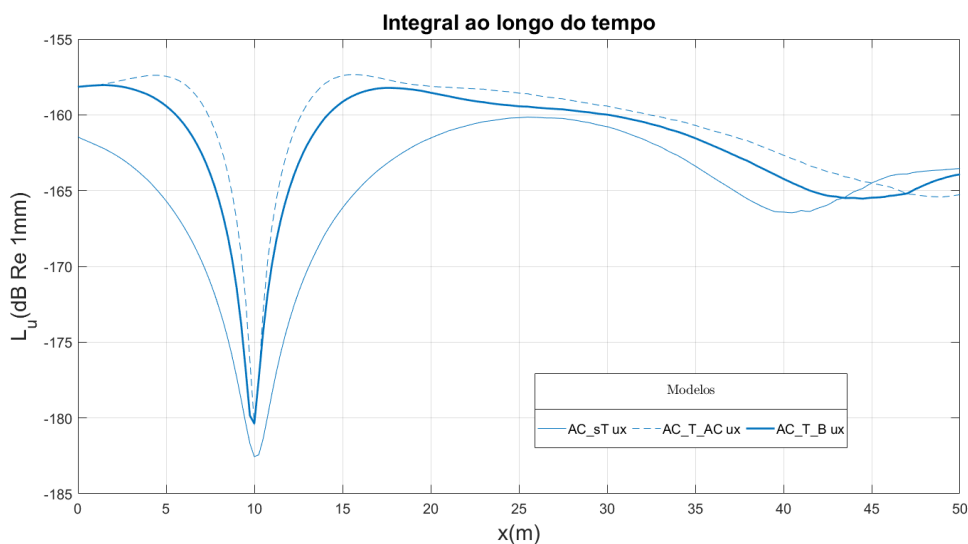


Figura 55 – Integral dos níveis de vibrações para a influência do túnel em  $x$

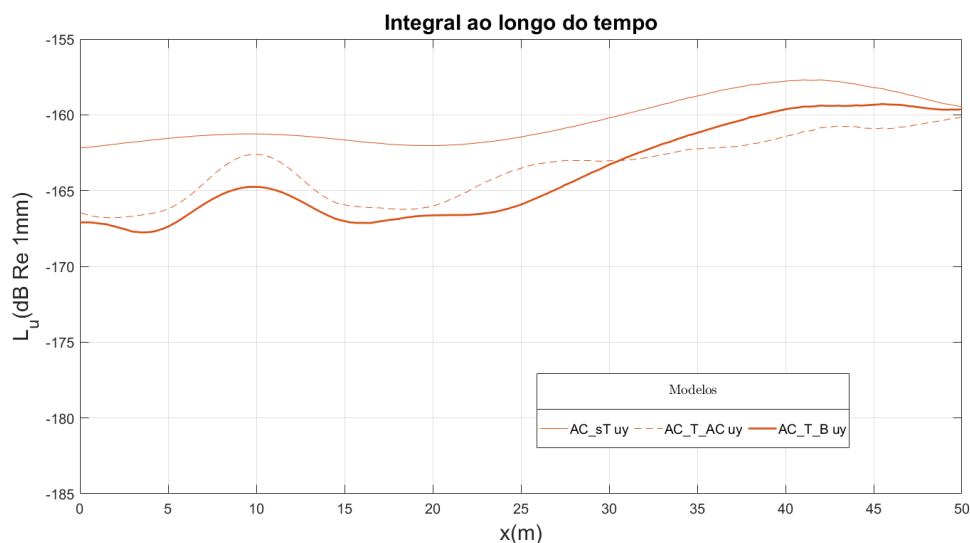


Figura 56 – Integral dos níveis de vibrações para a influência do túnel em y

Como dito no Ponto 4.3.1.4, o mesmo decaimento apresentado na Figura 55 e incremento na Figura 56 se devem ao motivo da carga ser vertical e o local onde esta foi colocada.

A Figura 55 e Figura 56 mostram claramente que ao acrescentar a estrutura do túnel, diminui o nível de vibração quando comparado ao modelo sem túnel. O modelo com túnel sem betão no anel (AC\_T\_AC) apresenta maiores integrais de níveis sonoros, o que pode ser associado a como o betão é mais rígido amortecendo mais as vibrações da carga vertical, mas ponderando essa característica ainda nota-se que o acréscimo do betão gera níveis de vibrações menores.

#### 4.3.2 Comportamento da trincheira vazia em um solo de areia compacta

Os exemplos avaliados neste Ponto têm por finalidade demonstrar as alterações de comportamento da onda quando incluído um método de mitigação ao modelo. É considerado uma carga pontual na soleira do túnel, em  $x=10$  m e  $y=15$  m. A camada de amortecimento escolhida é a recomendada no Ponto 3.4, de 20 m para a areia compacta.

Neste Ponto, analisa-se o comportamento da onda quando acrescentado ao modelo uma trincheira vazia com espessura de 0,4 m e localizada na superfície, em  $x=40$  m.

##### 4.3.2.1 Solo homogêneo de areia compacta com trincheira vazia de 3 m (AC\_T\_B\_TrV\_3)



O modelo proposto neste Ponto é para um solo homogêneo de areia compacta com a estrutura de um túnel e com uma trincheira vazia. Com recetores ao longo de toda a superfície. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 57.

A carga está representada por uma seta vertical vermelha na soleira da estrutura do túnel, em  $x=10$  m e  $y=15$  m. O túnel está a 20 m de profundidade da superfície ao centro do túnel. O furo tem diâmetro de 10 m e o anel de betão tem espessura de 0,375 m. A trincheira vazia adotada tem 3 m de profundidade e se encontra na superfície, em  $x=40$  m. Todas as cotas estão em metros.

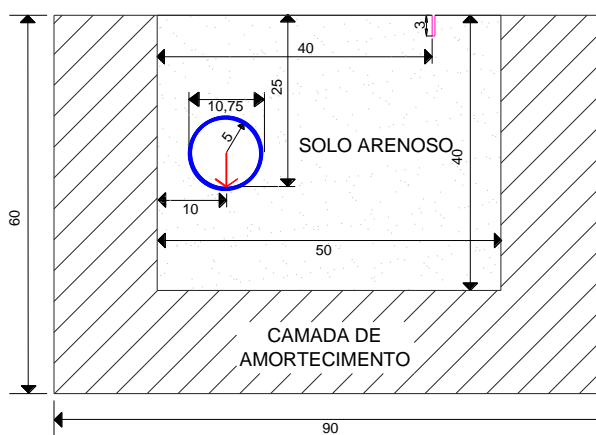


Figura 57 - Representação do modelo AC\_T\_B\_TrV\_3 com cotas em metros

Pode-se visualizar os deslocamentos em cada recetor na superfície pelo tempo na Figura 58. A amplitude é marcada pela intensidade com qual a linha é apresentada para  $x$  e para  $y$ .

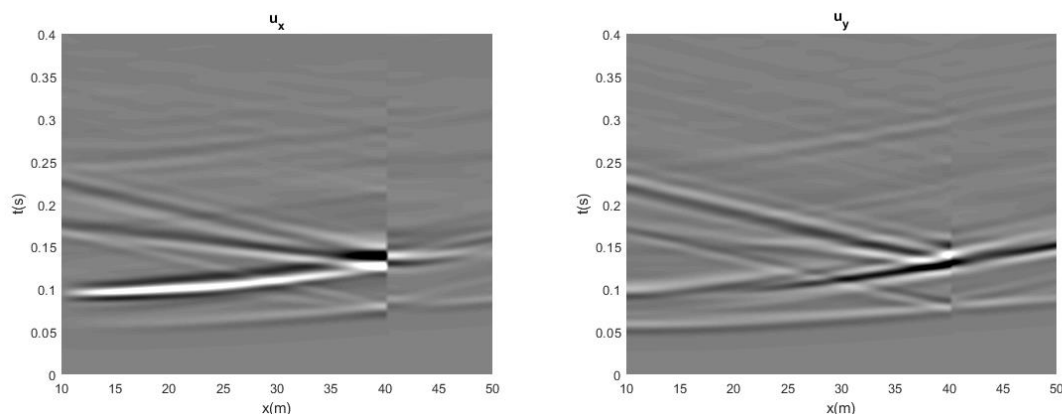


Figura 58– Deslocamentos calculados para AC\_T\_B\_TrV\_3

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, é representado na Figura 59, as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

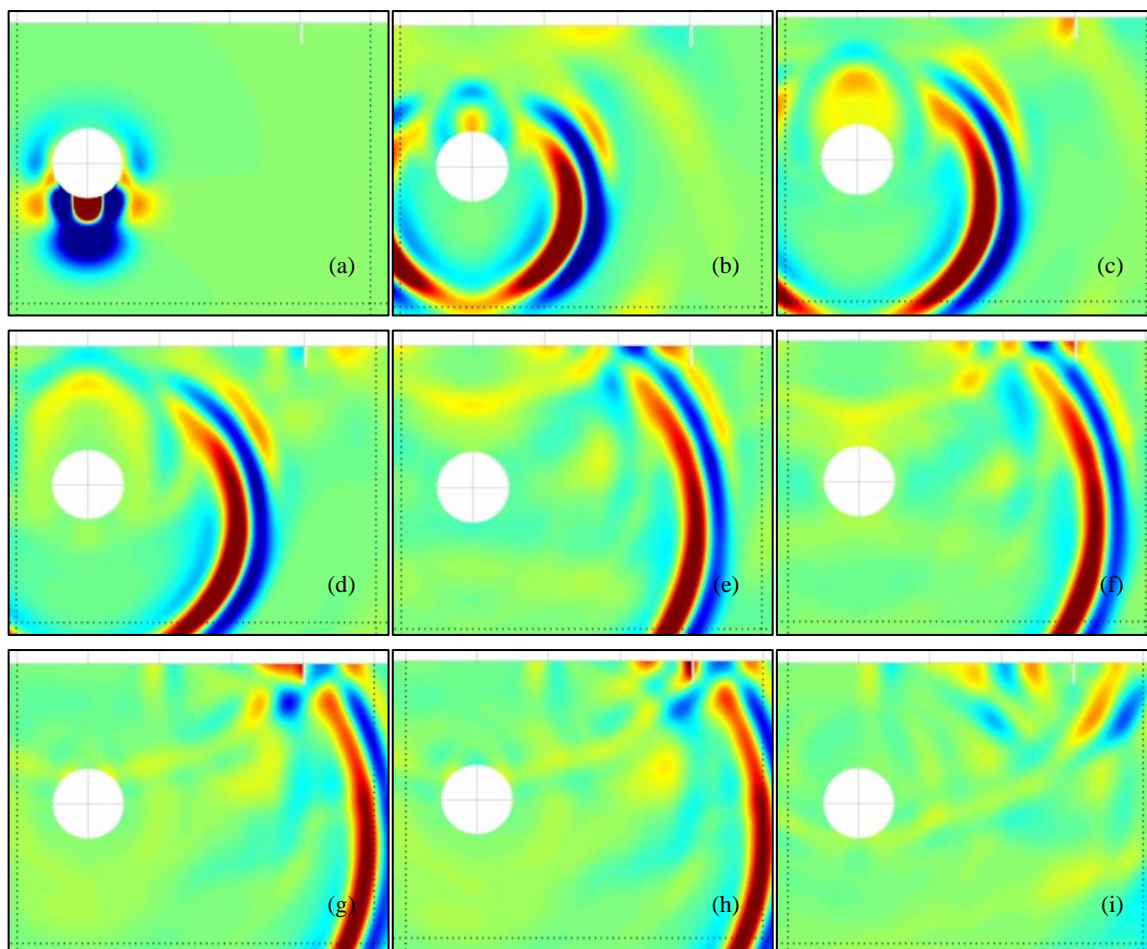


Figura 59 - Propagação da onda para solo homogêneo de areia compacta com estrutura do túnel com uma trincheira vazia de 3 m, sendo: (a)=32,8 ms, (b)=68,4 ms, (c)=79,3 ms, (d)=87,6 ms, (e)=114,9 ms, (f)=117,6 ms, (g)=136,8 ms, (h)=139,5 ms e (i)=158,7 ms.

Quando analisada a Figura 58 percebe-se tanto para  $x$  quanto  $y$  que ocorre uma quebra da vibração vinda e essa perde a intensidade que tinha antes. Observa-se na Figura 59 (d) que a trincheira criou uma área próxima a ela, a direita, protegida e que a vibração mais a frente veio irradiada de baixo, como demonstrado na Figura 59 (g).

O encontro da onda com a trincheira vazia gera um reflexão que pode ser reparada na Figura 58 no momento  $t=0,13$  s, nota-se que a vibração troca de inclinação e perde intensidade conforme vai para o lado esquerdo ( $x < 40$  m). Conseqüentemente, se pode destacar na Figura 59 (i) que existem reflexões para o lado esquerdo.

#### 4.3.2.2 Solo homogêneo de areia compacta com trincheira vazia de 5 m (AC\_T\_B\_TrV\_5)

O modelo proposto neste Ponto é para um solo homogêneo de areia compacta com a estrutura de um túnel e com uma trincheira vazia mais profunda que a do Ponto anterior. Com recetores ao longo de toda a superfície. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 57.

A carga está representada por uma seta vertical vermelha na soleira da estrutura do túnel, em  $x=10$  m e  $y=15$  m. O túnel está a 20 m de profundidade da superfície ao centro do túnel. O furo tem diâmetro de 10 m e o anel de betão tem espessura de 0,375 m. A trincheira vazia adotada está demarcada na cor rosa, tem 5 m de profundidade e se encontra na superfície, em  $x=40$  m. Todas as cotas estão em metros.

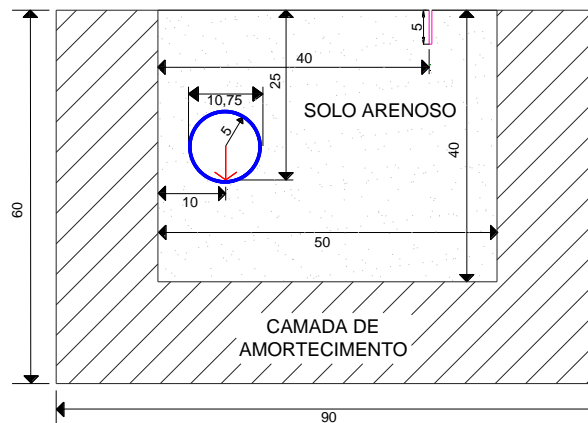


Figura 60- Representação do modelo AC\_T\_B\_TrV\_5 com cotas em metros

Pode-se visualizar os deslocamentos em cada recetor na superfície pelo tempo na Figura 61. A amplitude é marcada pela intensidade com qual a linha é apresentada para x e para y.

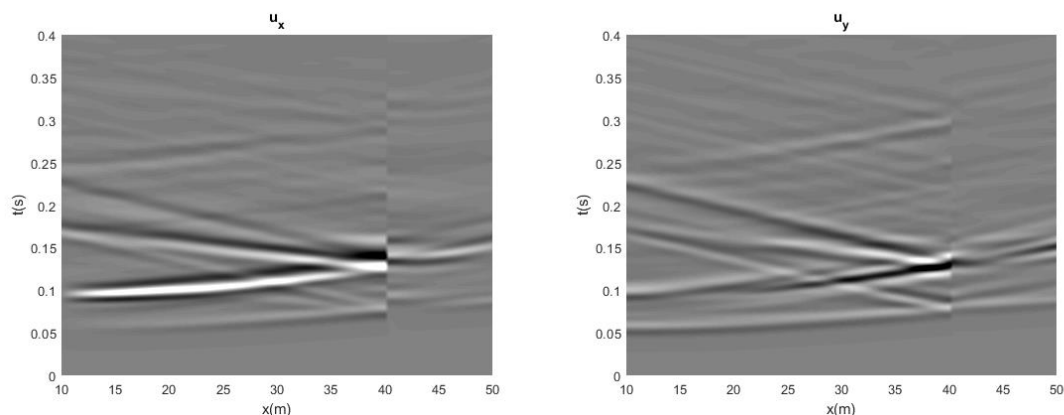


Figura 61– Deslocamentos calculados para AC\_T\_B\_TrV\_5

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, é simulado, na Figura 62, as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

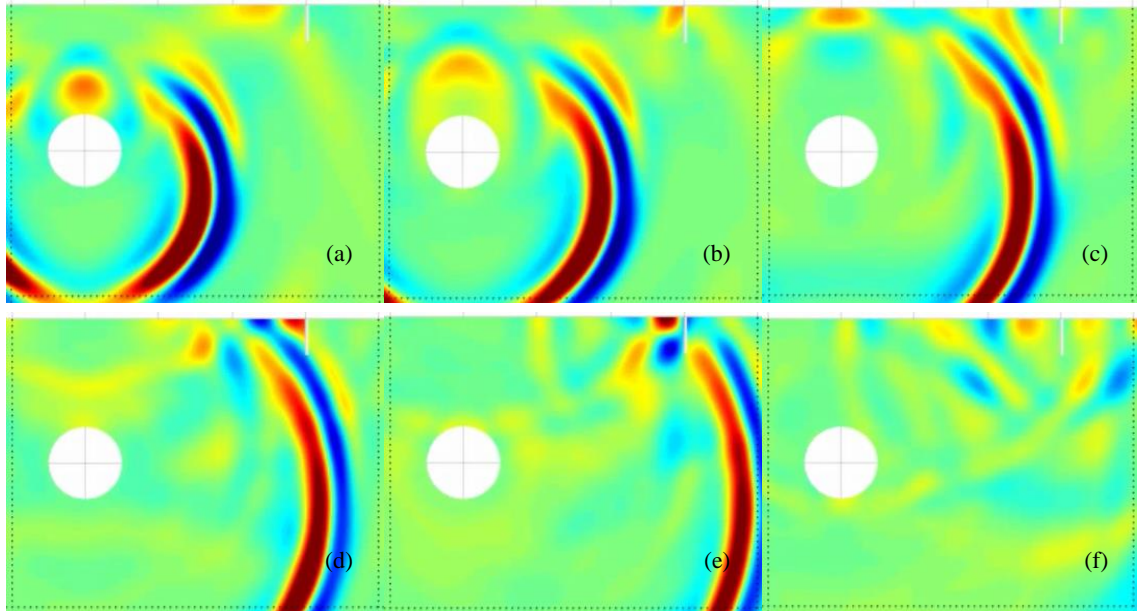


Figura 62- Propagação da onda para solo homogêneo de areia compacta com estrutura do túnel com uma trincheira vazia de 5 m, sendo: (a)=73,9 ms, (b)=82,1 ms, (c)=98,5 ms, (d)=117,7 ms, (e)=134,1 ms e (f)=161,4 ms.

Ao trocar a trincheira de 3 m pela de 5 m, repara-se os mesmo padrões antes ressaltados da quebra da vibração, como pode ser examinado na Figura 61, em aproximadamente 0,08 s ou na Figura 62 (b). Neste modelo, observa-se que devido a maior profundidade da barreira, essa implica em uma maior quebra e, conseqüentemente, uma maior zona protegida.

O encontro da onda com a trincheira vazia gera uma reflexão que pode ser notada na Figura 61 no momento  $t=0,13$  s para  $x$ . A partir do ponto de reflexão, ocorre uma troca da inclinação e perda da intensidade da onda conforme vai para o lado esquerdo ( $x < 40$  m). Conseqüentemente, se pode registrar na Figura 62 (f) que existem reflexões para o lado esquerdo.

#### 4.3.2.3 Níveis de vibrações máximos

Os níveis de vibrações máximos ao longo do tempo para cada recetor na superfície demonstram de forma fácil quais foram os locais que tiveram maior nível de vibração em relação ao deslocamento. A análise das regiões com níveis mais críticos permitem a previsão para quais locais os métodos de mitigação serão mais requisitados. Os níveis para os modelos anteriores realizados estão representados nas Figura 63 e Figura 64. A Figura 63 demonstra os níveis máximos para a coordenada  $x$  e a Figura 64 demonstra os níveis máximos para a coordenada  $y$ .

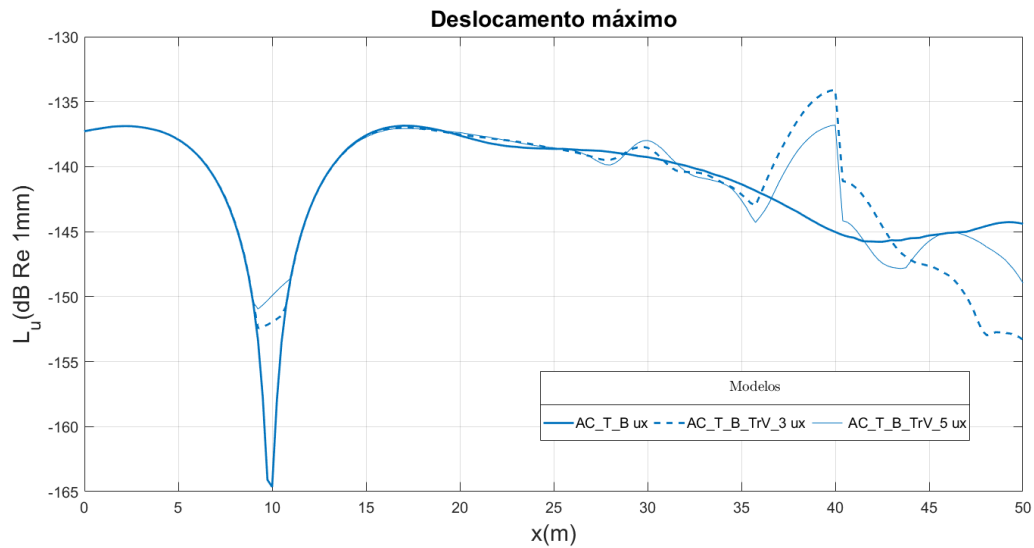


Figura 63 - Níveis de deslocamento máximo para a influência de uma trincheira vazia em x

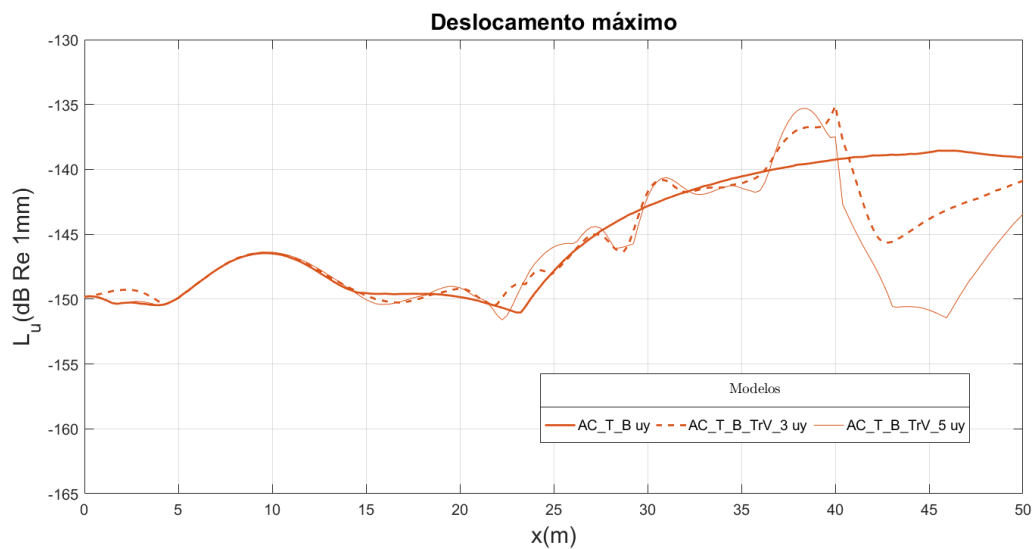


Figura 64 - Níveis de deslocamento máximo para a influência de uma trincheira vazia em y

Analisando as Figura 63 e Figura 64 observa-se que as linhas na região acima do túnel são muito semelhantes e começam a se diferenciar em aproximadamente  $x$  igual a 20 m. A partir de  $x=20$  m, os modelos com trincheira começam a ter ondulações, essas são associadas as reflexões geradas pela trincheira. Em  $x=40$  m, analisa-se um nível de vibração maior que pode ser explicado pelo facto de naquele ponto ser onde tem reflexões de maiores intensidades devido ao encontro da onda com a trincheira.

Como esperado se nota que, ao aumentar a profundidade da barreira, aumenta-se relativamente a eficiência dessa, gerando menores níveis de vibração máximos na região a direita da trincheira.

#### 4.3.2.4 Integral dos níveis de vibrações

O integral dos níveis de vibrações ao longo do tempo para cada recetor na superfície demonstra de forma fácil quais foram os locais que receberam ao longo do tempo maior número de ondas, sejam essas de forma direta ou por reflexão.

Ressalta-se que a análise das regiões com níveis mais críticos permitem a previsão para quais locais sofrem mais reflexões e sentem mais a vibração ao longo do tempo. Os níveis para os modelos anteriores realizados estão representados nas Figura 65 e Figura 66. A Figura 65 demonstra os níveis máximos para a coordenada x e a Figura 66 demonstra os níveis máximos para a coordenada y.

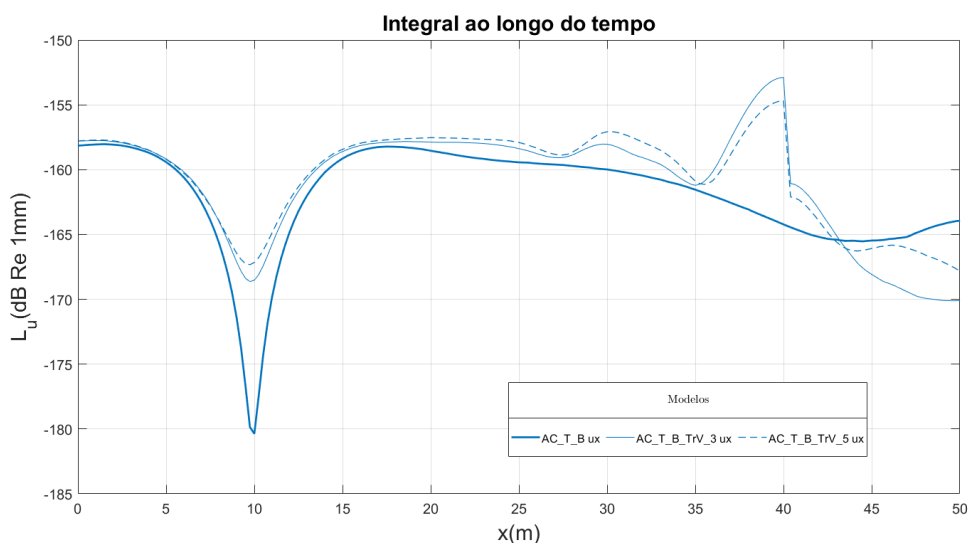


Figura 65 – Integral dos níveis de vibrações para a influência de uma trincheira vazia em X

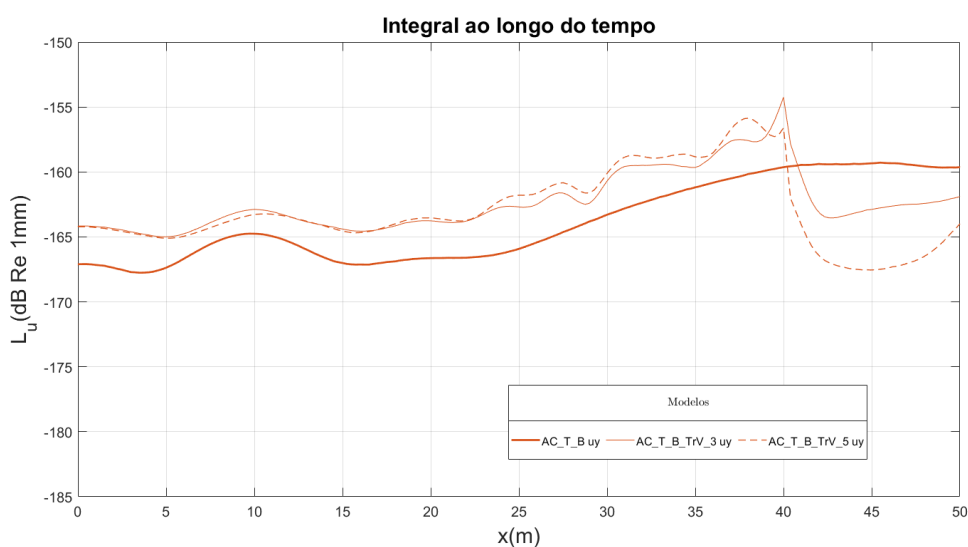


Figura 66 – Integral dos níveis de vibrações para a influência de uma trincheira vazia em y

Analisando as Figura 65 e Figura 66 repara-se que as linhas na região acima do túnel são muito semelhantes, porém os modelos com trincheira tem maiores níveis. Os maiores níveis de vibrações podem ser associados ao acúmulo de ondas recebidas nesse local pelas reflexões geradas pela trincheira.

Em  $x=40$  m, apresenta um nível de vibração maior que pode ser explicado como o local onde tem reflexões de maiores intensidades. Para a trincheira de maior profundidade nota-se menores níveis ao lado direito da mesma, demonstrando maior eficiência.

#### **4.3.3 Comportamento da parede enterrada em um solo de areia compacta**

Os exemplos avaliados neste Ponto têm por finalidade demonstrar as alterações de comportamento da onda quando incluído outro método de mitigação ao modelo. É considerado uma carga pontual na soleira do túnel, em  $x=10$  m e  $y=15$  m. A camada de amortecimento escolhida é a recomendada no Ponto 3.4, de 20 m para a areia compacta.

Neste Ponto, analisa-se o comportamento da onda quando acrescentado ao modelo uma parede enterrada de betão com espessura de 0,4 m e localizada na superfície, em  $x=40$  m.

##### *4.3.3.1 Solo homogêneo de areia compacta com parede enterrada de 5 m (AC\_T\_B\_PE\_5)*

O modelo proposto neste Ponto é para um solo homogêneo de areia compacta com a estrutura de um túnel e com uma parede enterrada. Com recetores ao longo de toda a superfície. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 67.

A carga está representada por uma seta vertical vermelha na soleira da estrutura do túnel, em  $x=10$  m e  $y=15$  m. O túnel está a 20 m de profundidade da superfície ao centro do túnel. O furo tem diâmetro de 10 m e o anel de betão tem espessura de 0,375 m. A parede enterrada em betão tem 5 m de profundidade e se encontra na superfície, em  $x=40$  m. Todas as cotas estão em metros.

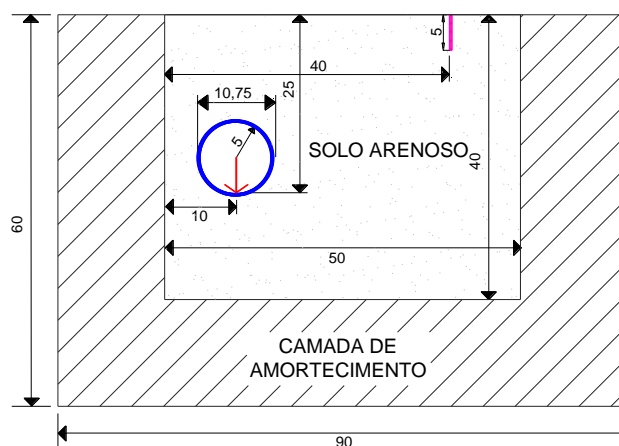


Figura 67- Representação do modelo AC\_T\_B\_PE\_5 com cotas em metros

Pode-se visualizar os deslocamentos ao longo da superfície pelo tempo na Figura 68. A amplitude é marcada pela intensidade com qual a linha é apresentada para x e para y.

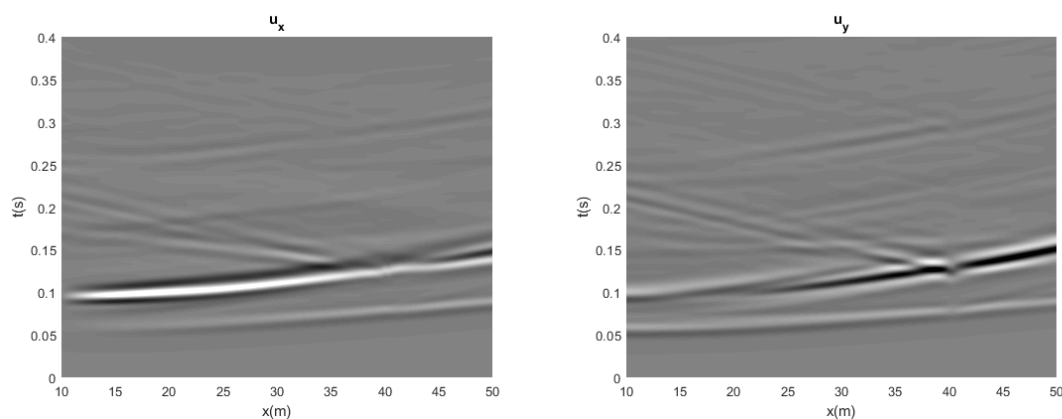


Figura 68– Deslocamentos calculados para AC\_T\_B\_PE\_5

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, é apresentado, na Figura 69, as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.



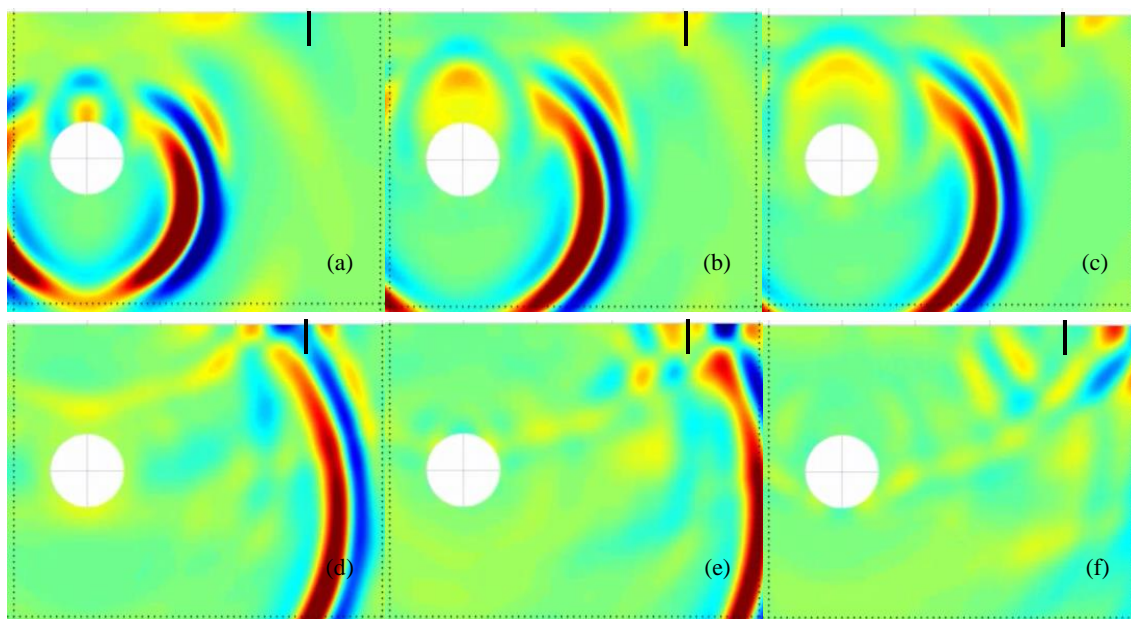


Figura 69- Propagação da onda para solo homogêneo de areia compacta com estrutura do túnel com uma parede enterrada de 5 m, sendo: (a)=68,4 ms, (b)=79,3 ms, (c)=84,8 ms, (d)=123,1 ms, (e)= 139,5 ms e (f)=153,2 ms

Analisando a Figura 68 verifica-se que a parede enterrada não gera grandes amortecimentos da vibração, por essa não gerar a quebra da vibração. A onda continua passando pela parede enterrada e sofre leve amortecimento associado ao material que compõe a parede. Logo, tornaria mais interessante uma parede enterrada de maior espessura mas essa não teria praticidade real pela dificuldade de execução.

Na Figura 69 (d) é possível observar a vibração passando pela parede enterrada. Na Figura 68 nota-se que quando a onda chega na parede, essa gera reflexões de intensidades baixas, que pode ser vista em Figura 69 (e).

#### 4.3.3.2 Níveis de vibrações máximos

Os níveis de vibrações máximos ao longo do tempo para cada recetor na superfície demonstram de forma fácil quais foram os locais que tiveram maior nível de vibração em relação ao deslocamento. A análise das regiões com níveis mais críticos permitem a previsão para quais locais os métodos de mitigação serão mais requisitados. Os níveis para os modelos anteriores realizados estão representados nas Figura 70 e Figura 71. A Figura 70 demonstra os níveis máximos para a coordenada x e a Figura 71 demonstra os níveis máximos para a coordenada y.

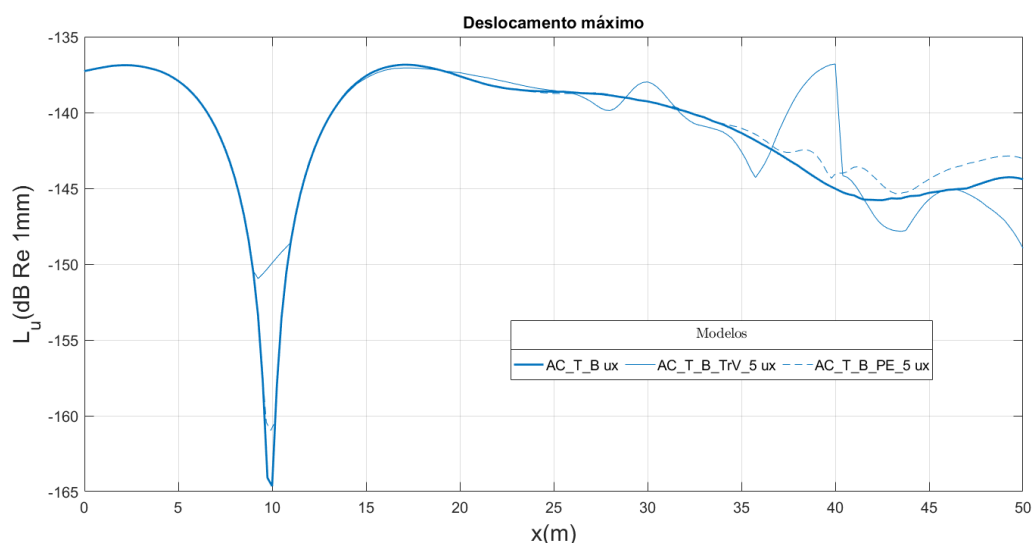


Figura 70 - Níveis de deslocamento máximo para a influência de diferentes métodos de mitigação em x

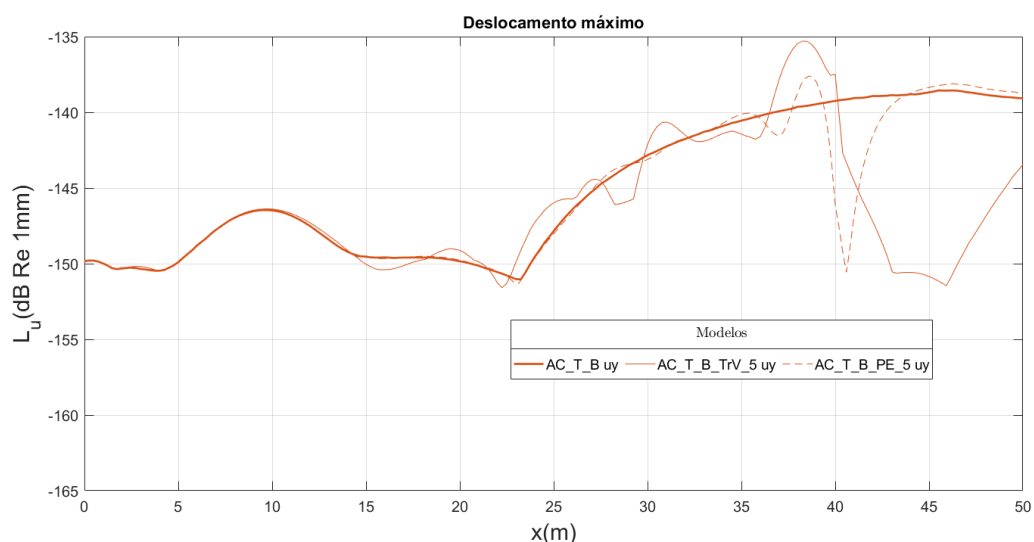


Figura 71 - Níveis de deslocamento máximo para a influência de diferentes métodos de mitigação em y

Analisando a Figura 70 e Figura 71 constata-se que o modelo com parede enterrada (AC\_T\_B\_PE\_5) gera bem menos reflexões, se aproximando ao modelo sem qualquer obstáculo (AC\_T\_B), do que o modelo com trincheira vazia (AC\_T\_B\_TrV\_5).

A parede enterrada implica em uma queda mais abrupta do nível de vibração quando as ondas chegam a parede enterrada. Logo, atesta-se que para a trincheira vazia existe uma maior zona protegida tanto para a coordenada x quanto para y, sendo visivelmente mais clara na coordenada

y. No entanto a parede enterrada quando colocada praticamente a face da construção garante uma boa mitigação da vibração.

#### 4.3.3.3 Integral dos níveis de vibrações

O integral dos níveis de vibrações ao longo do tempo para cada recetor na superfície estão representados nas Figura 72 e Figura 73. A Figura 72 demonstra os níveis máximos para a coordenada x e a Figura 73 demonstra os níveis máximos para a coordenada y.

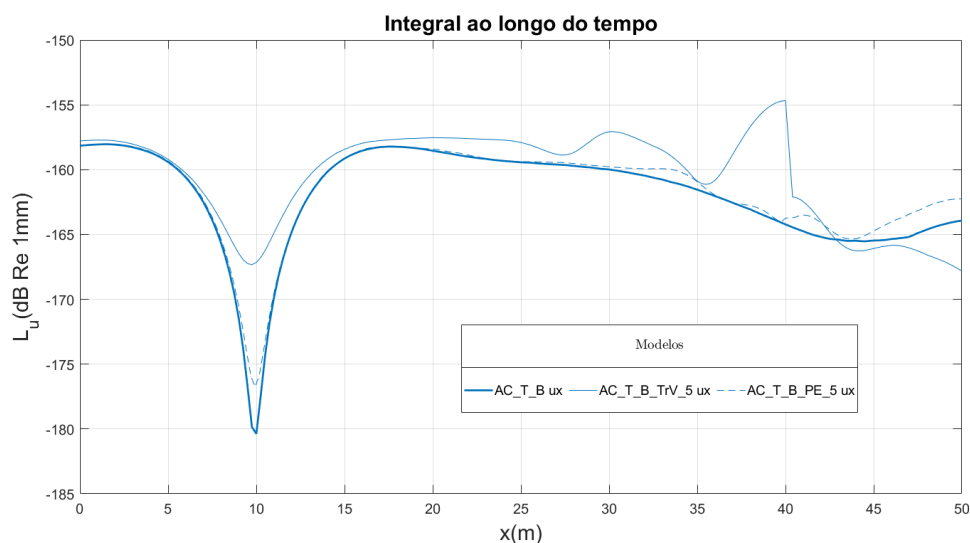


Figura 72 – Integral dos níveis de vibrações para a influência de diferentes métodos de mitigação em x

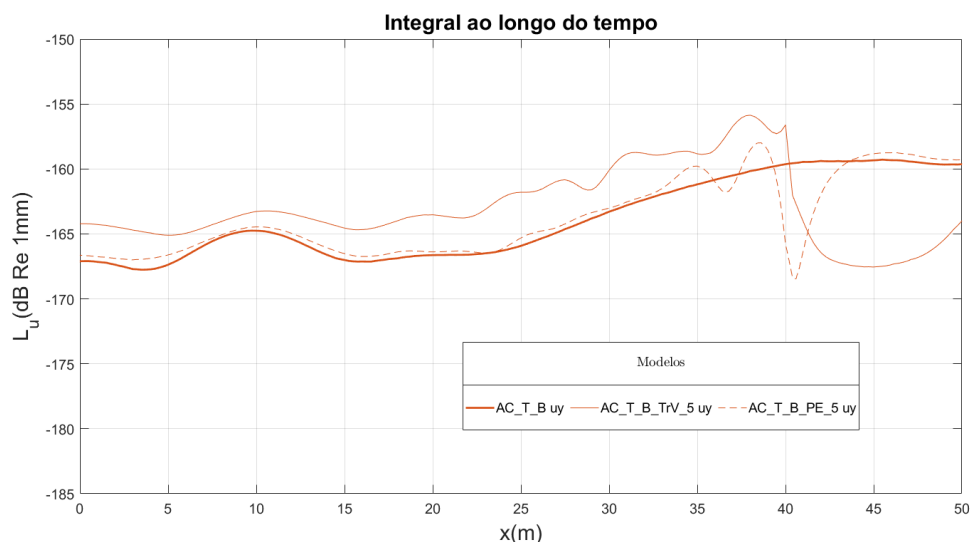


Figura 73 – Integral dos níveis de vibrações para a influência de diferentes métodos de mitigação em y

Analisando as Figura 72 e Figura 73 repara-se que devido as reflexões geradas pelas parede enterrada serem menores, a AC\_T\_B\_PE\_5 apresenta menores níveis de vibrações comparados com AC\_T\_TrV\_5. Porém ao comparar a eficiência de ambas, comprova-se como dito no Ponto anterior, que a trincheira vazia tem uma zona protegida maior, servindo melhor como um método de mitigação.

#### 4.3.4 Comportamento da estrutura do túnel inserida em um solo de argila dura

Para este Ponto, propõe-se a troca do solo de areia compacta para a argila dura. Os modelos avaliados têm por finalidade demonstrar as alterações de comportamento da onda quando a característica do meio é alterada e se os métodos de mitigação teriam os mesmo resultados obtidos anteriormente. Considera-se uma carga pontual em  $x=10$  m e  $y=15$  m, na soleira do túnel. A camada de amortecimento escolhida é a recomendada no Ponto 3.4, de 12 m para a argila dura.

##### 4.3.4.1 Solo homogêneo de argila dura com túnel de anel em betão (AD\_T\_B)

O modelo proposto neste Ponto é para um solo homogêneo de argila dura com a estrutura de um túnel e com recetores ao longo de toda a superfície. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 74.

A carga está representada por uma seta vertical vermelha na soleira da estrutura do túnel, em  $x=10$  m e  $y=15$  m. O túnel está a 20 m de profundidade da superfície ao centro do túnel. O furo tem diâmetro de 10 m e o anel em betão tem espessura de 0,375 m. As cotas estão em metros.

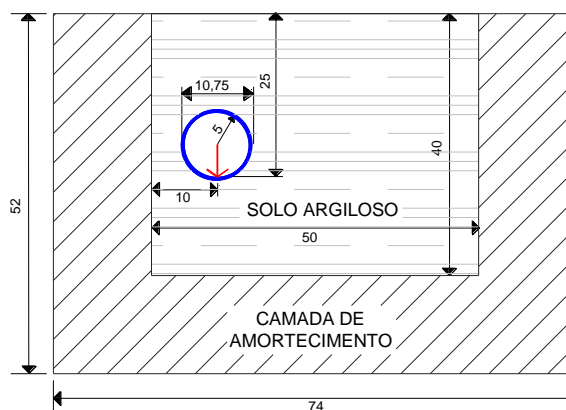


Figura 74- Representação do modelo AD\_T\_B com cotas em metros

Pode-se visualizar os deslocamentos em cada recetor na superfície ao longo do tempo na Figura 75. A amplitude é marcada pela intensidade com qual a linha é apresentada para x e para y.

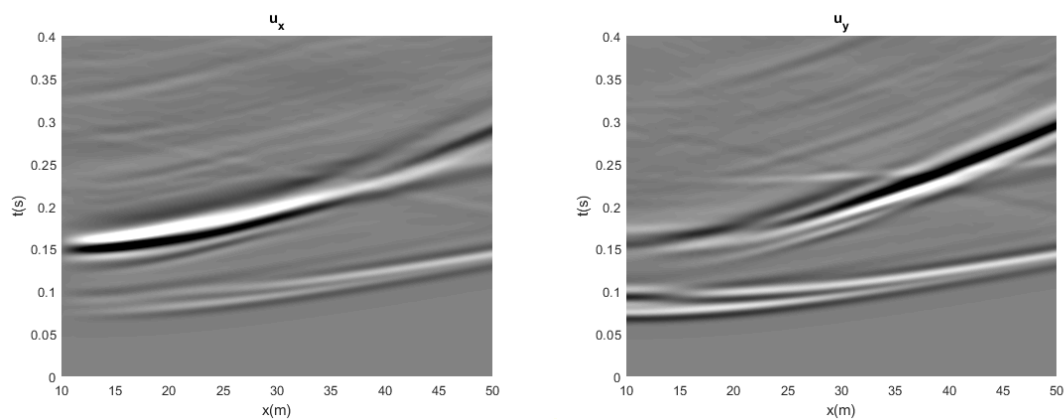


Figura 75– Deslocamentos calculados para AD\_T\_B

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, é demonstrado, na Figura 76, as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

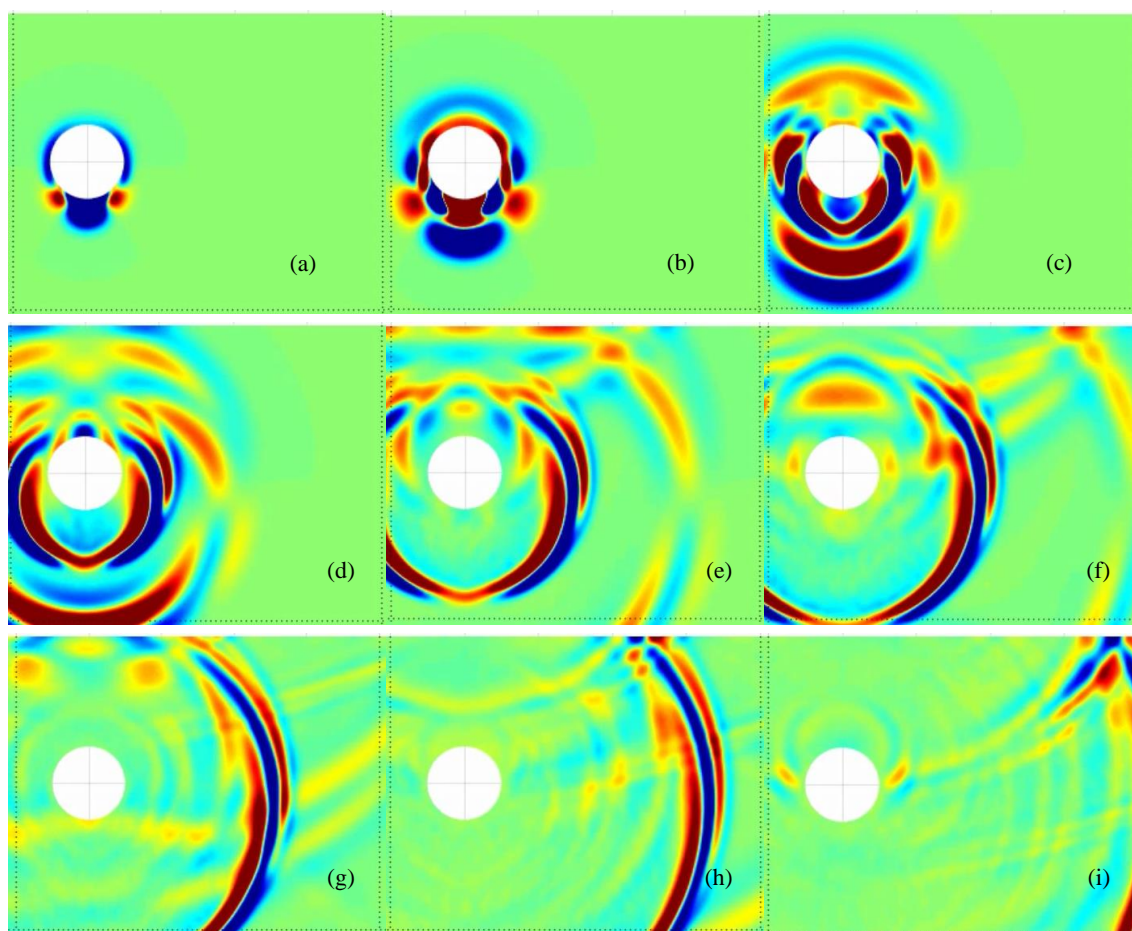


Figura 76- Propagação da onda para solo homogêneo de argila dura com estrutura do túnel, sendo: (a)= 27,4 ms, (b)= 38,3 ms, (c)=54,7 ms, (d)=71,1 ms, (e)=101,2 ms, (f)=125,9 ms, (g)=166,9 ms, (h)=213,4 ms e (i)= 276,3 ms

Analisando a Figura 75 é possível verificar que as ondas demoram mais tempo para atingir a superfície o que é associado a velocidade de onda para a argila dura ser menor que para a areia compacta. Evidenciando que não ocorrem quaisquer reflexões. Para este caso, constata-se que as vibrações são mais intensas que para a areia compacta.

#### 4.3.4.2 Solo homogêneo de argila dura com trincheira vazia de 5 m (AD\_T\_B\_TrV\_5)

O modelo proposto neste Ponto é para um solo homogêneo de argila dura com a estrutura de um túnel e com uma trincheira vazia mais profunda que a do Ponto anterior. Com recetores ao longo de toda a superfície. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 77.

A carga está representada por uma seta vertical vermelha na soleira da estrutura do túnel, em  $x=10$  m e  $y=15$  m. O túnel está a 20 m de profundidade da superfície ao centro do túnel. O furo tem diâmetro de 10 m e o anel de betão tem espessura de 0,375 m. A trincheira vazia adotada

tem 5 m de profundidade e se encontra na superfície, em  $x = 40$  m. Todas as cotas estão em metros.

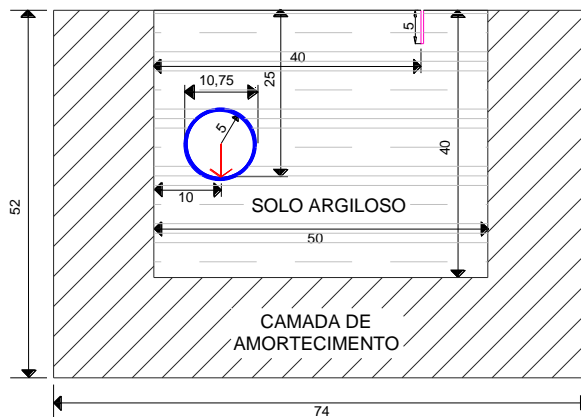


Figura 77- Representação do modelo AD\_T\_B\_TrV\_5 com cotas em metros

Pode-se visualizar os deslocamentos em cada recetor ao longo da superfície pelo tempo na Figura 78. A amplitude é marcada pela intensidade com qual a linha é apresentada para  $x$  e para  $y$ .

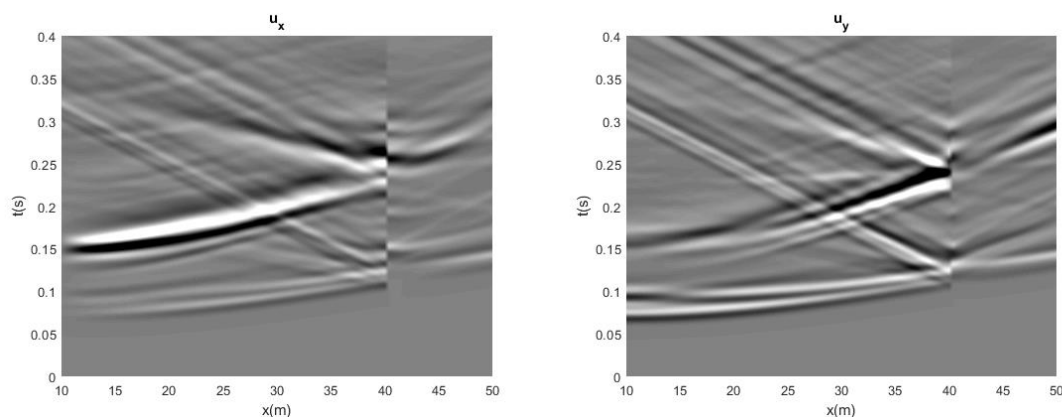


Figura 78– Deslocamentos calculados para AD\_T\_B\_TrV\_5

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, é demonstrado, na Figura 79, as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

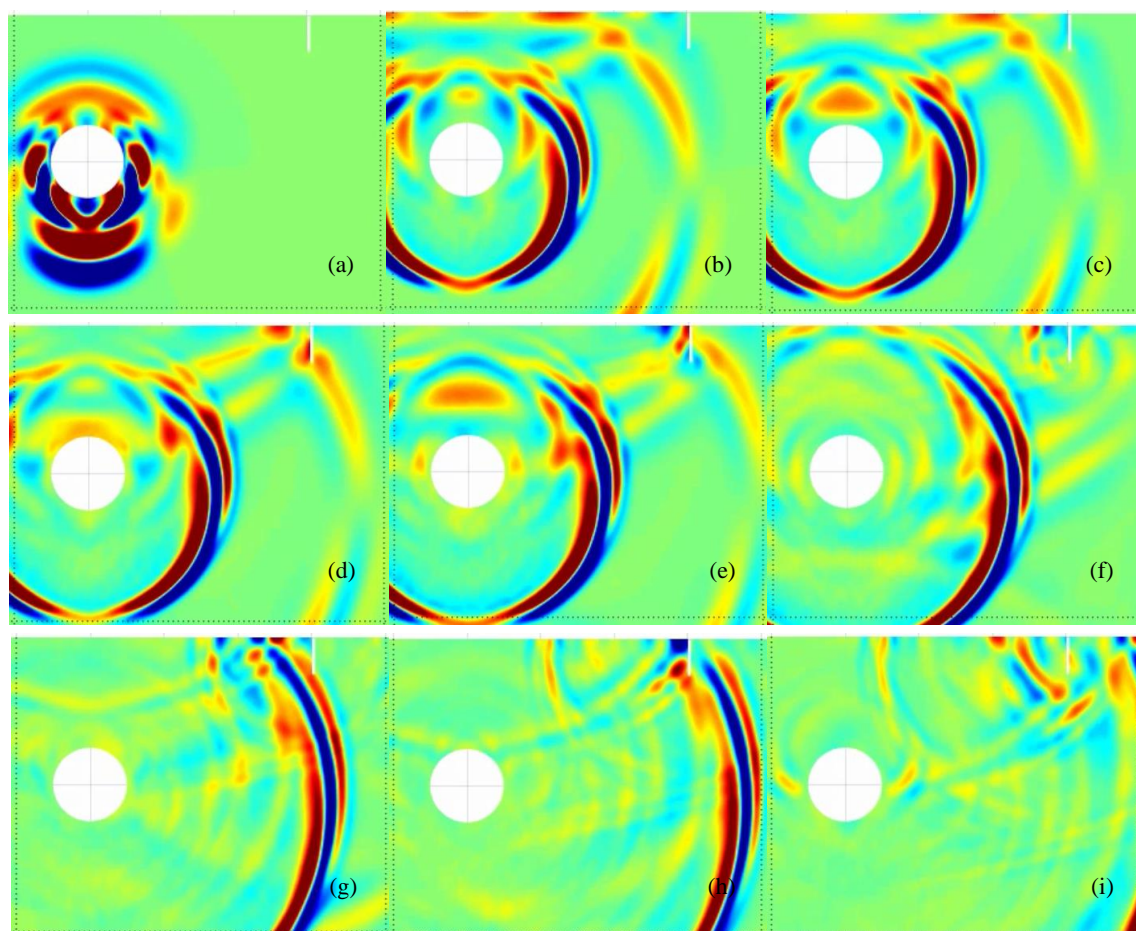


Figura 79- Propagação da onda para solo homogéneo de argila dura com estrutura do túnel e trincheira vazia de 5 m, sendo: (a)=49,2 ms, (b)=101,2 ms, (c)=106,7 ms, (d)=117,6 ms, (e)=125,9 ms, (f)=150,5 ms, (g)=210,7 ms, (h)=243,5 ms e (i)=284,6 ms

Analisando a Figura 78 repara-se uma quebra da intensidade, como foi vista para o caso da areia compacta. Porém, agora observa-se que o tempo que aumentou para a onda atingir a trincheira. Na Figura 79 (f) é possível notar a reflexão marcada na Figura 78 em aproximadamente  $t=0,1$  s. Na Figura 79 (i) é possível verificar a reflexão que ocorre em aproximadamente  $t=0,25$  segundos na Figura 78.

#### 4.3.4.3 Solo homogéneo de argila dura com parede enterrada em betão de 5 m (AD\_T\_B\_PE\_5)

O modelo proposto neste Ponto é para um solo homogéneo de argila dura com a estrutura de um túnel e com uma parede enterrada. Com recetores ao longo de toda a superfície. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 80.

A carga está representada por uma seta vertical vermelha na soleira da estrutura do túnel, em  $x=10$  m e  $y=15$  m. O túnel está a 20 m de profundidade, da superfície ao centro do túnel. O furo



tem diâmetro de 10 m e o anel de betão tem espessura de 0,375 m. A parede enterrada em betão tem 5 m de profundidade e se encontra na superfície, em  $x = 40$  m. Todas as cotas estão em metros.

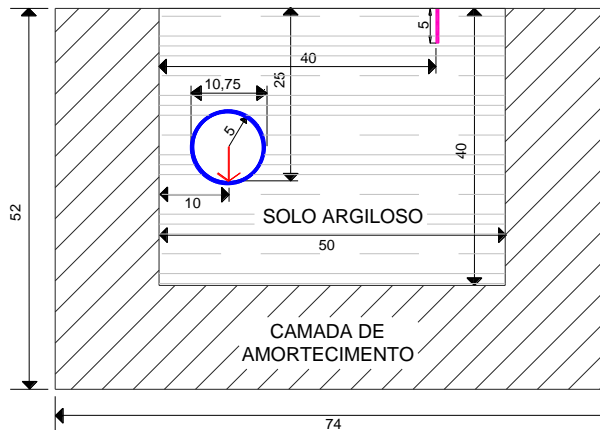


Figura 80- Representação do modelo AD\_T\_B\_PE\_5 com cotas em metros

Pode-se visualizar os deslocamentos em cada recetor ao longo da superfície pelo tempo na Figura 81. A amplitude é marcada pela intensidade com qual a linha é apresentada para  $x$  e para  $y$ .

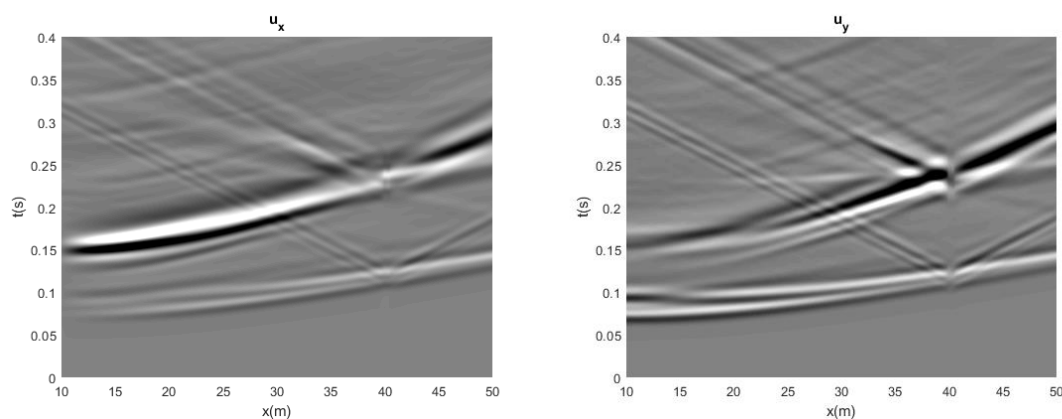


Figura 81– Deslocamentos calculados para AD\_T\_B\_PE\_5

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, é demonstrado, na Figura 82, as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

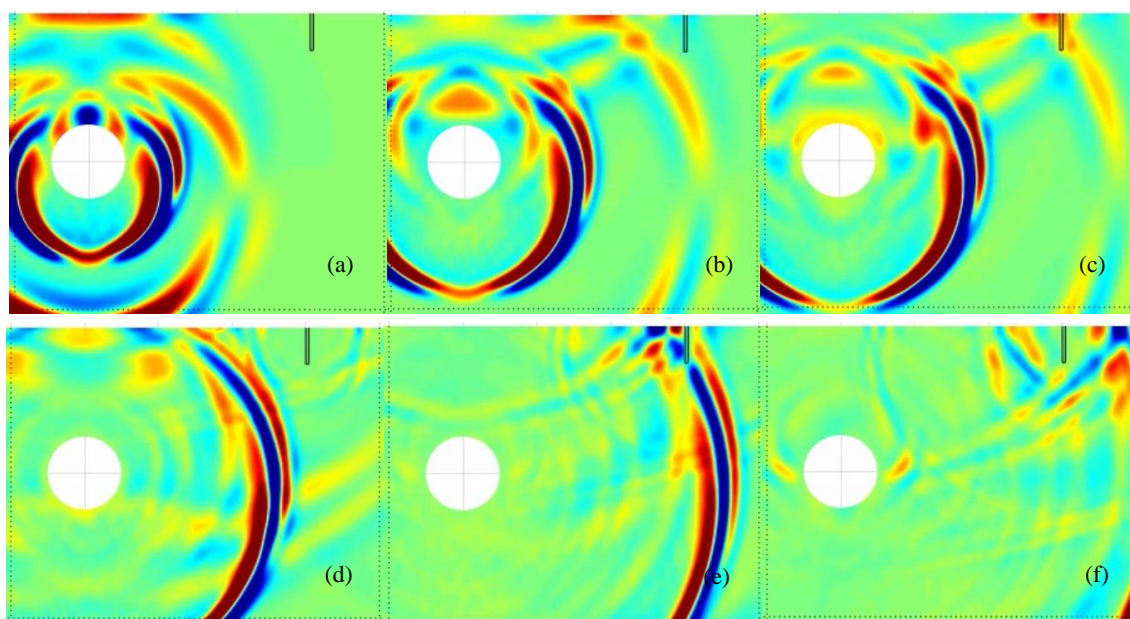


Figura 82- Propagação da onda para solo homogéneo de argila dura com estrutura do túnel e parede enterrada de 5 m, sendo: (a)=76,6 ms, (b)=106,7 ms, (c)=120,4 ms, (d)=169,6 ms, (e)=227,1 ms e (f)=284,6 ms.

Na Figura 81 verifica-se em  $x=40$  m existe uma diminuição da amplitude por ser onde esta a parede enterrada. Porém, logo após o termino dessa, a amplitude continua quase igual a amplitude que era antes, não apresentando uma melhora significativa para a mitigação da vibração como pode ser vista na Figura 82 (c).

Nota-se que as reflexões geradas pela parede enterrada são bem visíveis na Figura 81, em  $t=0,13$  s e em  $t=0,25$  s, e podem ser visualizadas nas Figura 82 (c) e (f), respectivamente.

#### 4.3.4.4 Níveis de vibrações máximos

Os níveis de vibrações máximos ao longo do tempo para cada recetor na superfície demonstram de forma fácil quais foram os locais que tiveram maior nível de vibração em relação ao deslocamento. A análise das regiões com níveis mais críticos permitem a previsão para quais locais os métodos de mitigação serão mais requisitados. Os níveis para os modelos anteriores realizados estão representados nas Figura 83 e Figura 84. A Figura 83 demonstra os níveis máximos para a coordenada  $x$  e a Figura 84 demonstra os níveis máximos para a coordenada  $y$ .

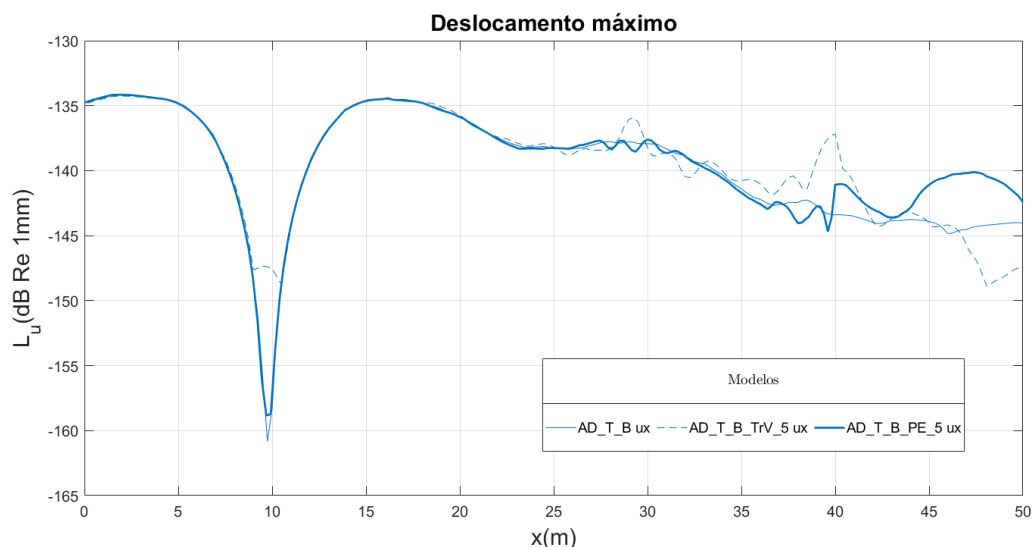


Figura 83 - Níveis de deslocamento máximo para a argila dura em x

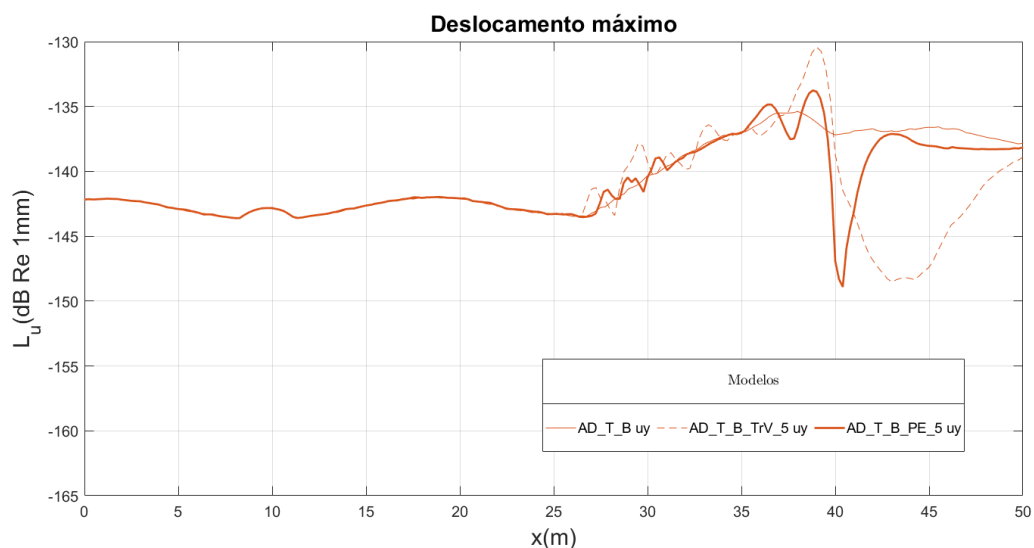


Figura 84 - Níveis de deslocamento máximo para a argila dura em y

Analisando as Figura 83 e Figura 84, o primeiro ponto importante a reparar é que os níveis de vibrações são maiores que para a areia compacta, uma características esperada sabendo-se que o solo de argila dura é menos rígido e apresenta maiores deslocamentos.

Para o solo de argila dura, a parede enterrada gera reflexões com maiores amplitudes que podem ser visualizadas nas Figura 83 e Figura 84, se aproximando as reflexões geradas pela trincheira vazia. Os padrões esperados em relação a parede enterrada e trincheira vazia se repetem, podendo se afirmar novamente que a trincheira se mostra ser mais eficiente, pois protege uma área maior depois dela.

#### 4.3.4.5 Integral dos níveis de vibrações

O integral dos níveis de vibrações ao longo do tempo para cada recetor na superfície estão representados nas Figura 85 e Figura 86. A Figura 85 demonstra os níveis máximos para a coordenada x e a Figura 86 demonstra os níveis máximos para a coordenada y.

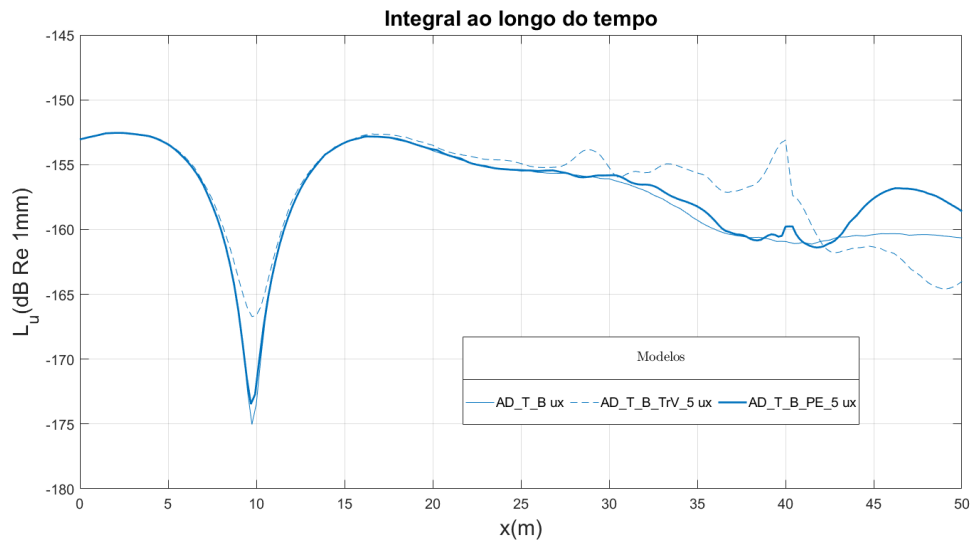


Figura 85 – Integral dos níveis de vibrações para a argila dura em x

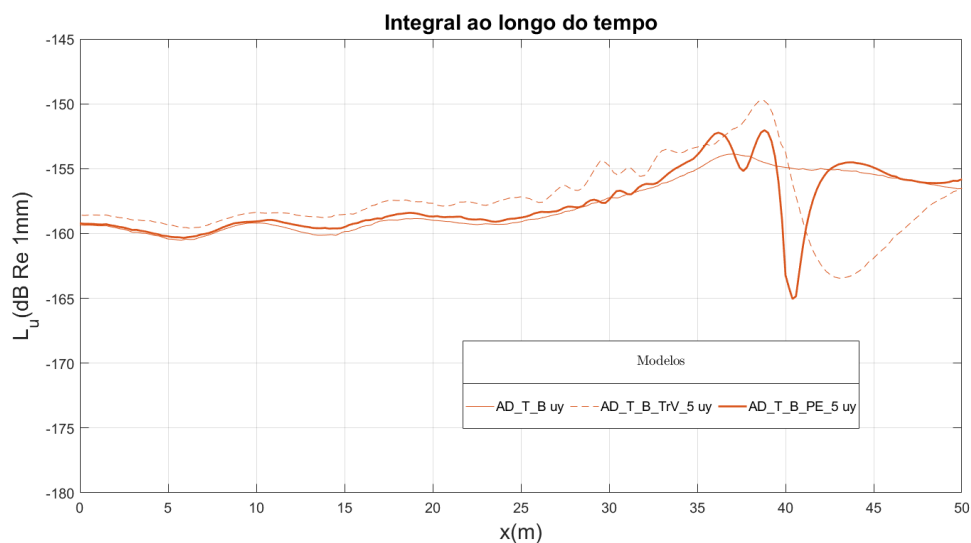


Figura 86 – Integral dos níveis de vibrações para a argila dura em y

Analisando as Figura 85 e Figura 86 nota-se que para a argila dura a linha para a parede enterrada e trincheira vazia estão mais próximas, devidos as reflexões serem maiores para esse solo. No local onde encontra-se a parede enterrada tem um decaimento mais acentuado, porém a zona protegida é menor do que para a trincheira vazia.

#### 4.3.5 Comportamento da carga na superfície acima de uma placa em betão para solo de areia compacta

Para este Ponto propõe-se analisar o conjunto de três modelos de propagação de vibrações para um meio homogêneo de areia compacta, considerando uma carga pontual na superfície em cima de uma placa de betão de 10 m x 0,5 m.

Os modelos avaliados aqui têm por finalidade demonstrar as alterações de comportamento da onda quando o local da carga é alterado para a superfície sobre uma placa em betão e se os métodos de mitigação teriam os mesmo resultados obtidos anteriormente. É considerado uma carga pontual na superfície, em  $x=10$  m. A camada de amortecimento escolhida é a recomendada no Ponto 3,4, de 20 m para a areia compacta.

O primeiro modelo é só medido com a carga na superfície, para o segundo acrescenta-se uma trincheira vazia com 5 m de profundidade por 0,4 m de espessura, em  $x=40$  m na superfície e no terceiro é colocado ao invés da trincheira, uma parede enterrada de betão com as mesmas características.

##### 4.3.5.1 Solo homogêneo de areia compacta com carga na superfície (AC\_Sup\_B)

O modelo proposto neste Ponto é para um solo homogêneo de areia compacta com uma placa de betão na superfície, simulando uma via e com recetores ao longo de toda a superfície. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 87.

A carga está representada por uma seta vertical vermelha, em  $x=10$  m, acima de uma placa de betão com dimensões de 10 m e espessura de 0,5 m. As cotas todas estão em metros.

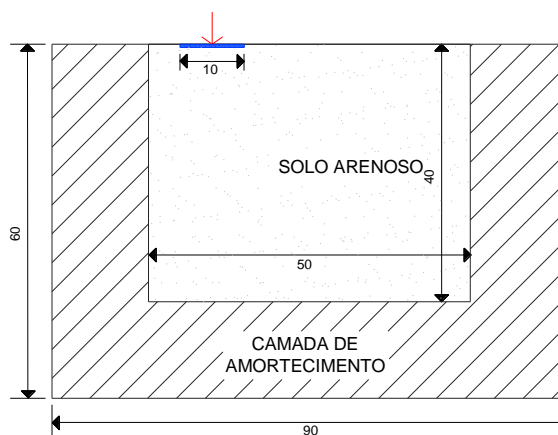


Figura 87- Representação do modelo AC\_Sup\_B com cotas em metros

Pode-se visualizar os deslocamentos em cada recetor ao longo da superfície pelo tempo na Figura 75. A amplitude é marcada pela intensidade com qual a linha é apresentada para x e para y.

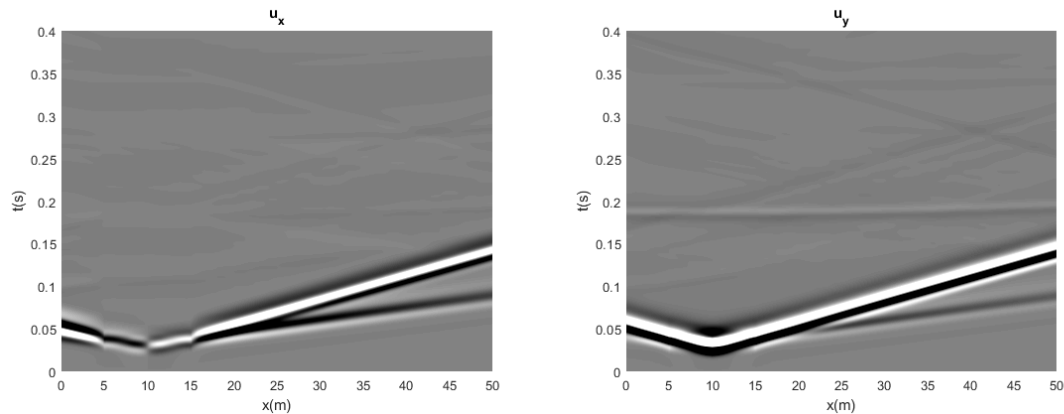


Figura 88– Deslocamentos calculados para AC\_Sup\_B

A demonstra a propagação das ondas ao longo do tempo começando em (a) e indo até (f). Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, é demonstrado, na Figura 89, as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

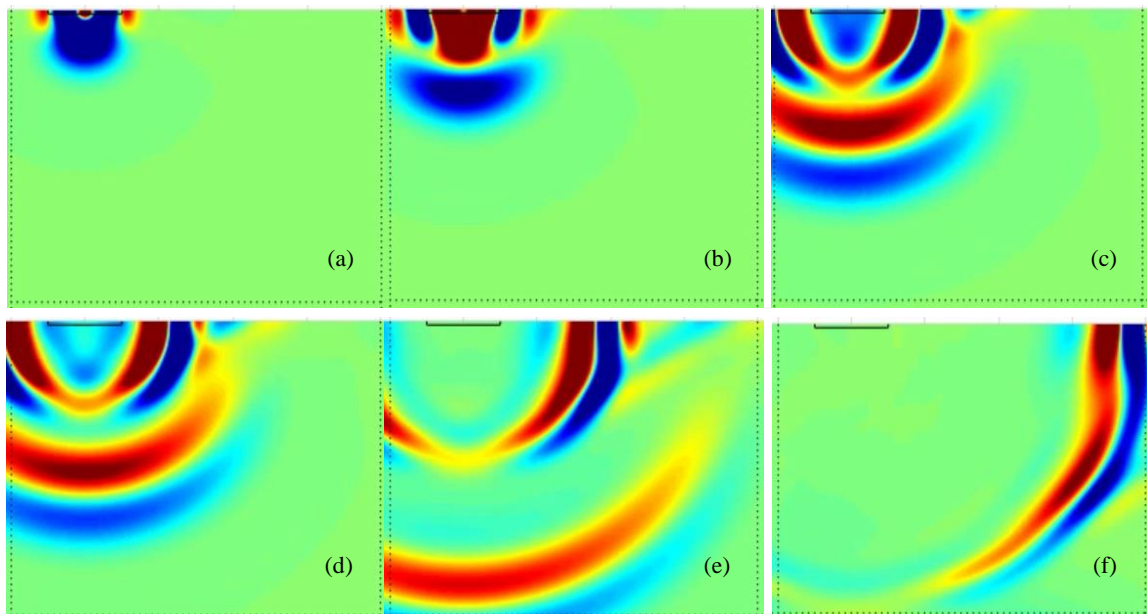


Figura 89- Propagação da onda para solo homogéneo de areia compacta com carga em uma placa de betão na superfície, sendo: (a)=29,6 ms, (b)=39,5 ms, (c)=54,3 ms, (d)=59,2 ms, (e)=74,0 ms e (f)=133,2 ms.

Analisando a Figura 88 nota-se uma linha reta da propagação da vibração ao longo de toda superfície a partir do local da carga. Para x, nota-se que no local onde está a placa de betão a

amplitude é menor por a carga ser vertical. Na Figura 89 (a) nota-se que a propagação ocorre de forma mais rápida na placa de betão e depois é irradiada para o solo.

#### 4.3.5.2 Solo homogéneo de areia compacta com carga na superfície com trincheira vazia de 5 m (AC\_Sup\_B\_TrV\_5)

O modelo proposto neste Ponto é para um solo homogéneo de areia compacta com uma placa de betão na superfície e com um método de mitigação. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 90.

A carga está representada por uma seta vertical vermelha, em  $x=10$  m, acima de uma placa de betão com dimensões de 10 m e espessura de 0,5 m. A trincheira vazia está indicada em rosa como um corte no modelo e tem 5 m por 0,4 m de espessura, a trincheira está localizada em  $x=40$  m. As cotas todas estão em metros.

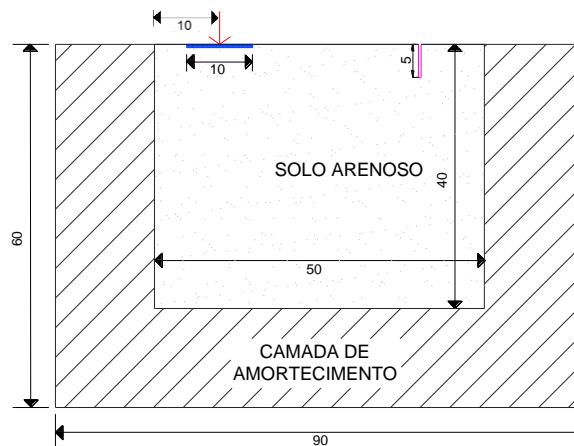


Figura 90- Representação do modelo AC\_Sup\_B\_TrV\_5 com cotas em metros

Pode-se visualizar os deslocamentos em cada recetor ao longo da superfície pelo tempo na Figura 91. A amplitude é marcada pela intensidade com qual a linha é apresentada para  $x$  e para  $y$ .

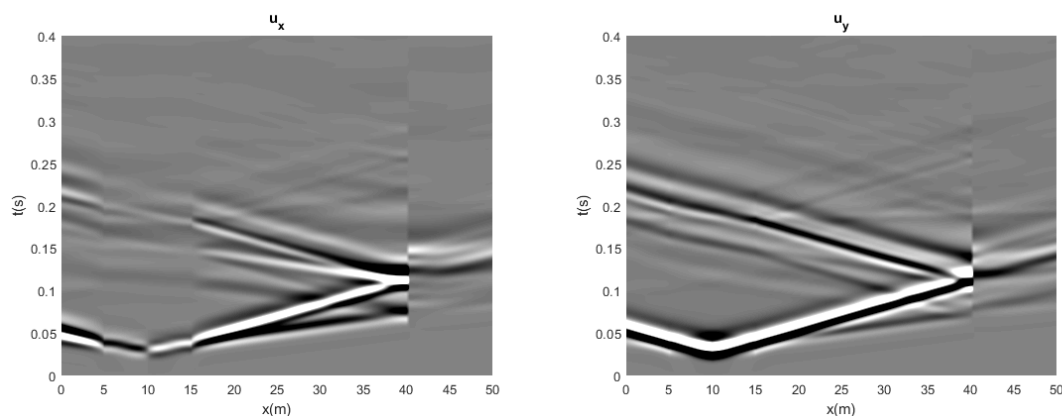


Figura 91– Deslocamentos calculados para AC\_Sup\_B\_TrV\_5

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, é apresentado, na Figura 92, as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

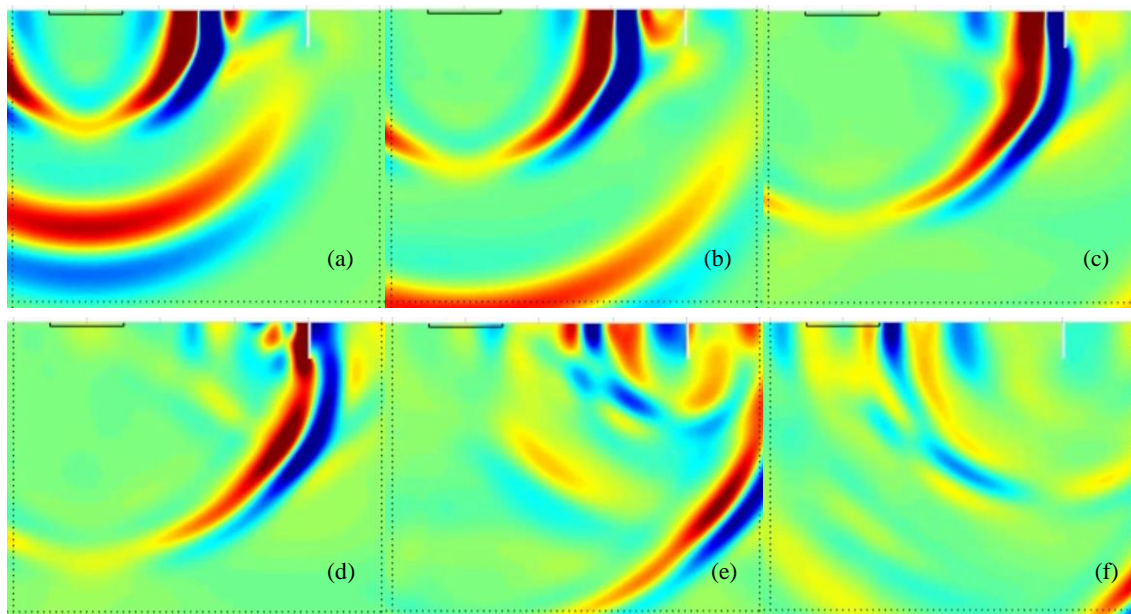


Figura 92 - Propagação da onda para solo homogéneo de areia compacta com carga em uma placa de betão na superfície e trincheira vazia de 5 m, sendo: (a)=66,2 ms, (b)=81,4 ms, (c)=106,9 ms, (d)=117,0 ms, (e)=147,6 ms e (f)= 178,1 ms.

Analisando a Figura 91 verificca-se perfeitamente a quebra da propagação da vibração para  $x= 40$  m. Nota-se que a vibração que chega na região a direita da trincheira vem por baixo dessa, como pode ser visto na Figura 92 (c) e (d). Quando a reflexão causada pela trincheira vazia chega na placa de betão ocorre uma notável queda para  $x$  da amplitude, em  $t= 0,2$  s da Figura 91, e que pode ser vista na Figura 92 (f).

#### 4.3.5.3 Solo homogéneo de areia compacta com carga na superfície com parede enterrada de 5 m (AC\_Sup\_B\_PE\_5)

O modelo proposto neste Ponto é para um solo homogéneo de areia compacta com uma placa de betão na superfície e com um método de mitigação. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 93.

A carga está representada por uma seta vertical vermelha, em  $x= 10$  m, acima de uma placa de betão com dimensões de 10 m e espessura de 0,5 m. A parede enterrada de betão está indicada em rosa e tem 5 m de profundidade por 0,4 m de espessura, a parede está localizada em  $x= 40$  m. As cotas todas estão em metros.



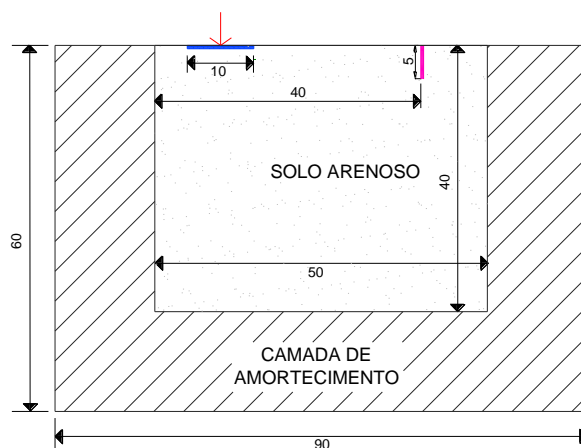


Figura 93- Representação do modelo AC\_Sup\_B\_PE\_5 com cotas em metros

Pode-se visualizar os deslocamentos em cada recetor ao longo da superfície pelo tempo na Figura 94. A amplitude é marcada pela intensidade com qual a linha é apresentada para x e para y.

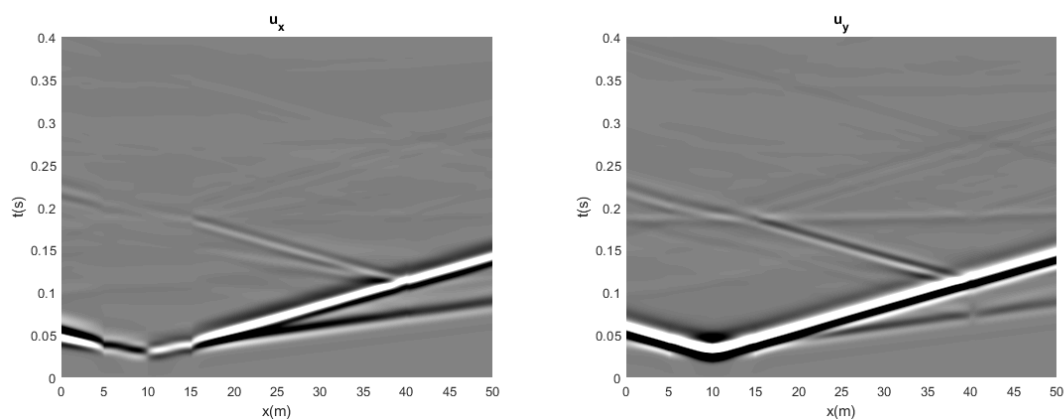


Figura 94– Deslocamentos calculados para AC\_Sup\_B\_PE\_5

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, é representado, na Figura 95, as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

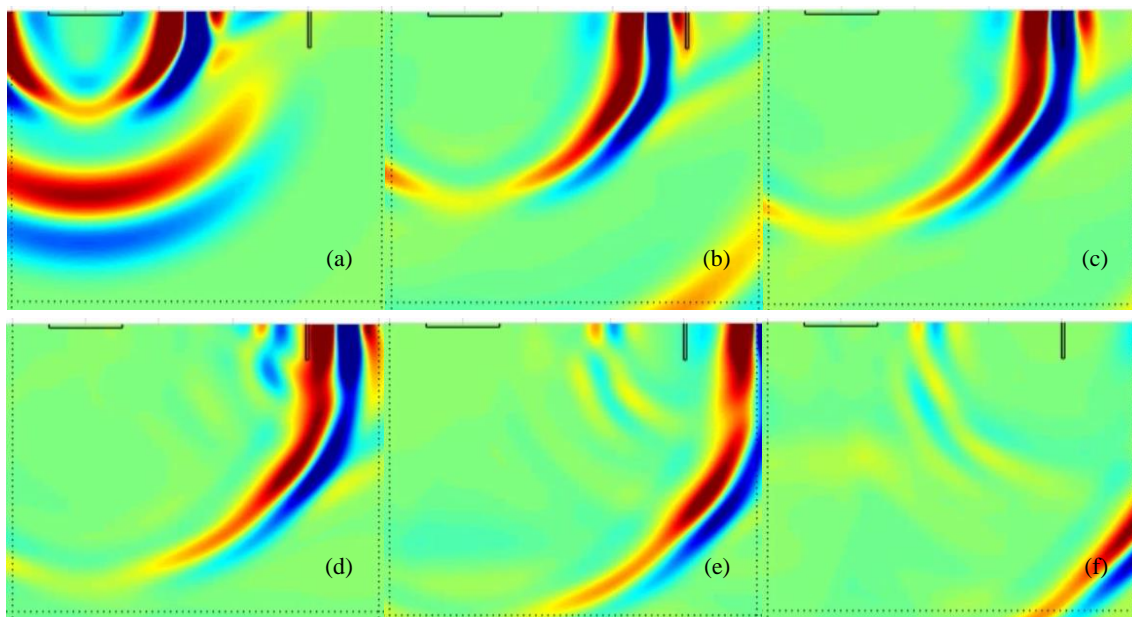


Figura 95- Propagação da onda para solo homogêneo de argila dura com estrutura do túnel e parede enterrada de 5 m, sendo: (a)= 60,0 ms, (b)=92,8 ms, (c)=103,7 ms, (d)=120,1 ms, (e)=136,4 ms e (f)=158,3 ms.

Analisando a Figura 94 constata-se que a parede enterrada tem um amortecimento quase insignificante, como pode ser visto na Figura 95 (c). Toda a vibração passa sem sofrer perda real na amplitude.

A parede gera uma reflexão em  $t=0,1$  s da Figura 94, como pode ser vista na Figura 95 (e).

#### 4.3.5.4 Níveis de vibrações máximos

Os níveis de vibrações máximos ao longo do tempo para cada recetor na superfície demonstram de forma fácil quais foram os locais que tiveram maior nível de vibração em relação ao deslocamento. A análise das regiões com níveis mais críticos permitem a previsão para quais locais os métodos de mitigação serão mais requisitados. Os níveis para os modelos anteriores realizados estão representados nas Figura 96 e Figura 97. A Figura 96 demonstra os níveis máximos para a coordenada x e a Figura 97 demonstra os níveis máximos para a coordenada y.

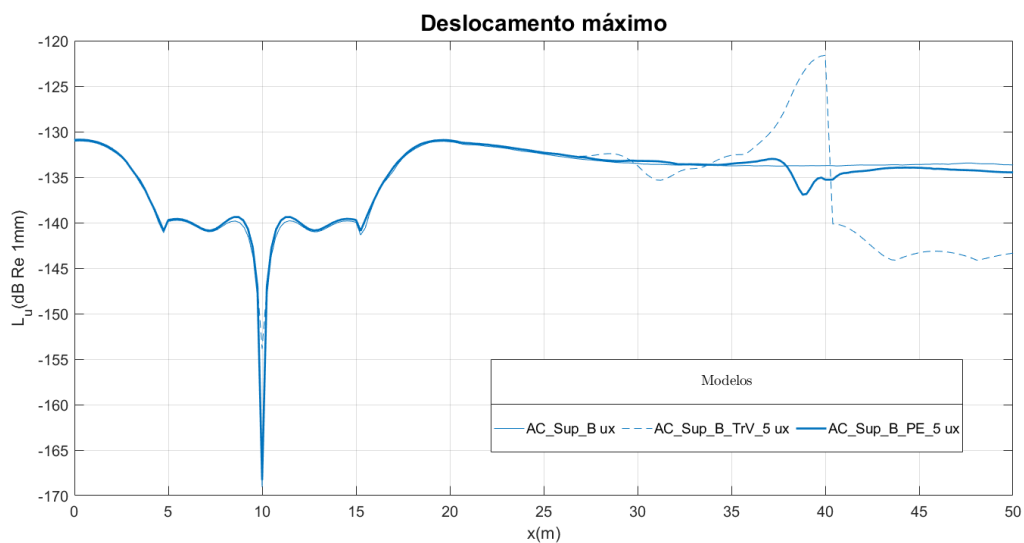


Figura 96 - Níveis de deslocamento máximo para carga em uma placa de betão na superfície em x

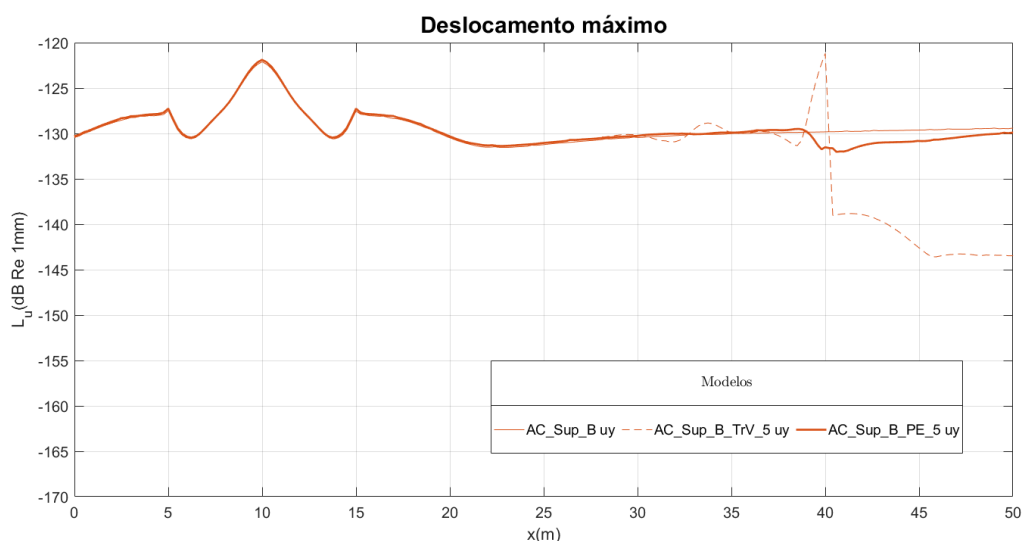


Figura 97 - Níveis de deslocamento máximo para carga em uma placa de betão na superfície em y

Analisando as Figura 96 e Figura 97 observa-se o decaimento para y e o pico para x no local da carga, como antes explicado, é associado a carga vertical, mesmo que essa esteja na superfície.

Nota-se que a reflexão gerada pela parede enterrada não é significativa e essa também não apresenta um amortecimento da vibração bom.

A trincheira vazia (AC\_Sup\_B\_TrV\_5) mostra-se muito eficiente pois tem uma quebra da vibração transmitida e como essa é na superfície poucas ondas passam por baixo da trincheira.

Para a carga na superfície é possível notar que a trincheira não gera grandes reflexões, garantindo uma eficiência desse modo de mitigação.

#### 4.3.5.5 Integral dos níveis de vibrações

O integral dos níveis de vibrações ao longo do tempo para cada recetor na superfície estão representados nas Figura 98 e Figura 99. A Figura 98 demonstra os níveis máximos para a coordenada x e a Figura 99 demonstra os níveis máximos para a coordenada y.

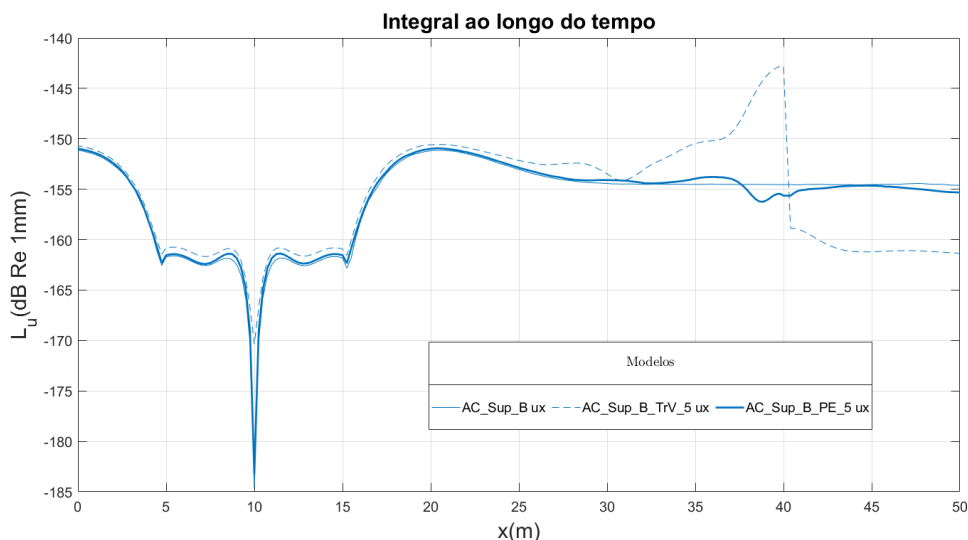


Figura 98 – Integral dos níveis de vibrações para carga em uma placa de betão na superfície em x

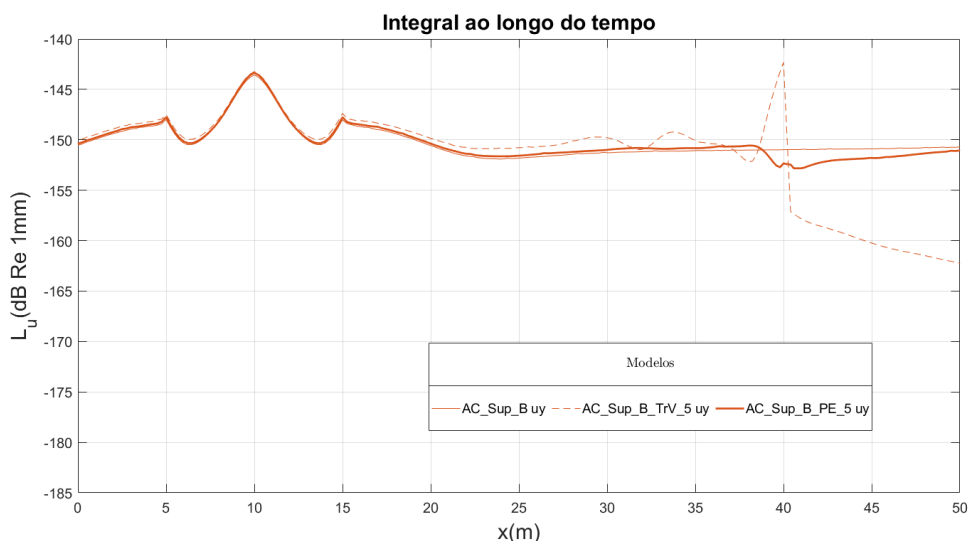


Figura 99 – Integral dos níveis de vibrações para carga em uma placa de betão na superfície em y

Como dito no Ponto anterior, não existem reflexões notáveis, logo, o fator que mais influencia para o integral dos níveis de vibrações dos modelos, são as ondas diretas. Analisando as Figura 98 e Figura 99 fica claro como a trincheira tem melhor eficiência para mitigar a vibração.

#### **4.3.6 Comportamento da estrutura do túnel menos profundo para solo de areia compacta**

Para este Ponto propõe-se analisar o conjunto de três modelos de propagação de vibrações para um meio homogêneo de areia compacta com uma carga na soleira de um túnel à 10 m de profundidade, do centro do túnel a superfície.

Os modelos avaliados aqui têm por finalidade demonstrar as alterações de comportamento da onda quando se diminui a profundidade da estrutura do túnel e se os métodos de mitigação teriam os mesmo resultados obtidos anteriormente. É considerado uma carga pontual na superfície, em  $x=10$  m. A camada de amortecimento escolhida é a recomendada no Ponto 3.4, de 20 m para a areia compacta.

O primeiro modelo é só medido com a carga na soleira do novo local da estrutura do túnel, para o segundo acrescenta-se uma trincheira vazia com 5 m de profundidade por 0,4 m de espessura, em  $x=40$  m na superfície e no terceiro é colocado ao invés da trincheira, uma parede enterrada de betão com as mesmas características e local.

##### *4.3.6.1 Solo homogêneo de areia compacta com túnel menos profundo (AC\_T2\_B)*

O modelo proposto neste Ponto é para um solo homogêneo de areia compacta com uma estrutura de um túnel com 10 m de profundidade e com recetores ao longo de toda a superfície. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 100.

A carga está representada por uma seta vertical vermelha na soleira da estrutura do túnel, em  $x=10$  m e  $y=25$  m. O túnel está a 10 m de profundidade da superfície ao centro do túnel. O furo tem diâmetro de 10 m e o anel em betão tem espessura de 0,375 m. As cotas todas estão em metros.

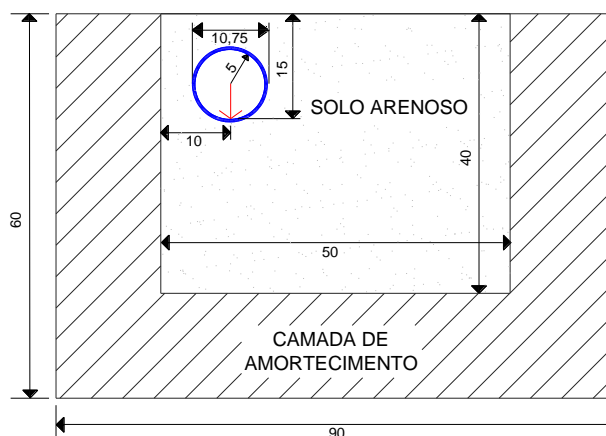


Figura 100- Representação do modelo AC\_T2\_B com cotas em metros

Pode-se visualizar os deslocamentos em cada recetor ao longo da superfície pelo tempo na Figura 101. A amplitude é marcada pela intensidade com qual a linha é apresentada para x e para y.

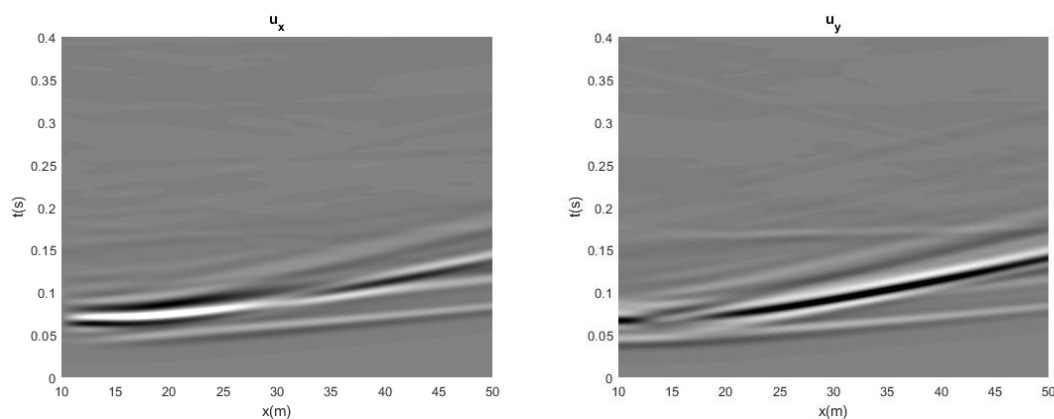


Figura 101– Deslocamentos calculados para AC\_T2\_B

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, é representado, na Figura 102, as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

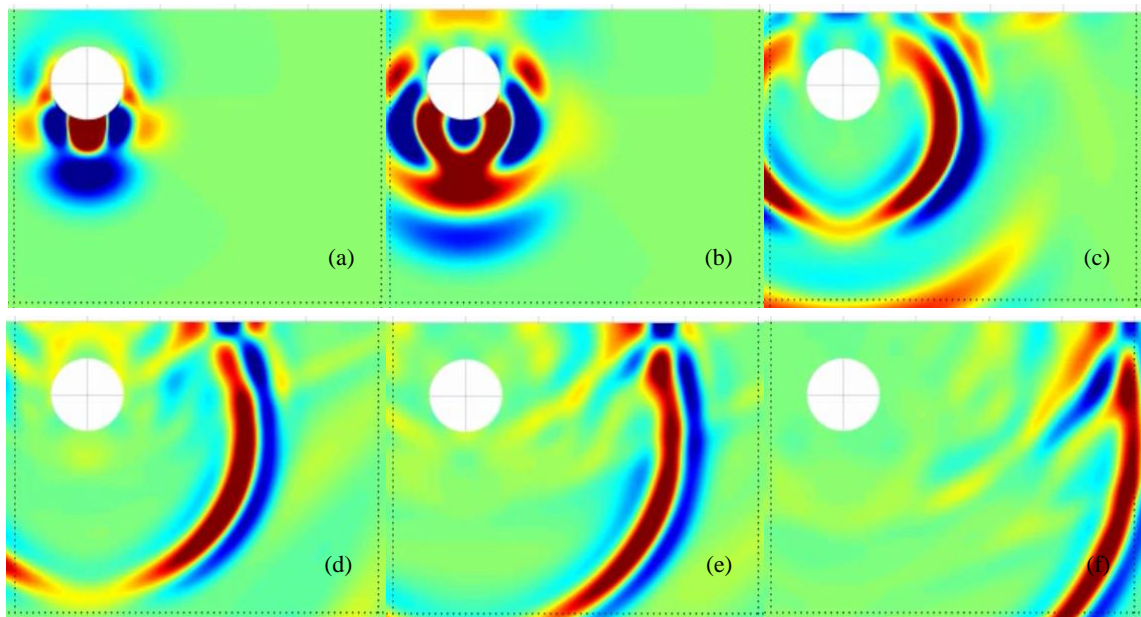


Figura 102- Propagação da onda para solo homogêneo de areia compacta com túnel de 10 m de profundidade, sendo: (a)= 34,7 ms, (b)=45,0 ms, (c)=69,3 ms, (d)=90,1 ms, (e)=107,4 ms e (f)=138,6 ms.

Observa-se que as ondas chegam mais rapidamente na superfície devido à proximidade ser maior quando comparado ao túnel com 20 m de profundidade, como pode ser visto na Figura 102 (b). As ondas secundárias estão mais próximas das ondas primárias na Figura 101.

#### 4.3.6.2 Solo homogêneo de areia compacta com túnel menos profundo com trincheira vazia de 5 m (AC\_T2\_B\_TrV\_5)

O modelo proposto neste Ponto é para um solo homogêneo de areia compacta com uma estrutura de um túnel com 10 m de profundidade e uma trincheira vazia. Com recetores ao longo de toda a superfície. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 100.

A carga está representada por uma seta vertical vermelha na soleira da estrutura do túnel, em  $x=10$  m e  $y=25$  m. O túnel está a 10 m de profundidade da superfície ao centro do túnel. O furo tem diâmetro de 10 m e o anel em betão tem espessura de 0,375 m. A trincheira está demonstrada em rosa e tem 5 m de profundidade por 0,4 m de espessura. As cotas estão todas em metros.

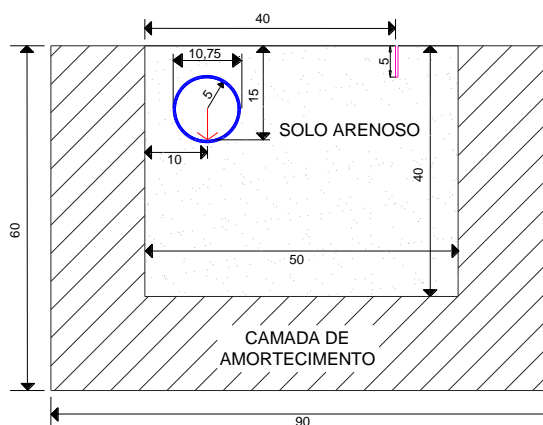


Figura 103- Representação do modelo AC\_T2\_B\_TrV\_5 com cotas em metros

Pode-se visualizar os deslocamentos em cada recetor ao longo da superfície pelo tempo na Figura 104. A amplitude é marcada pela intensidade com qual a linha é apresentada para x e para y.

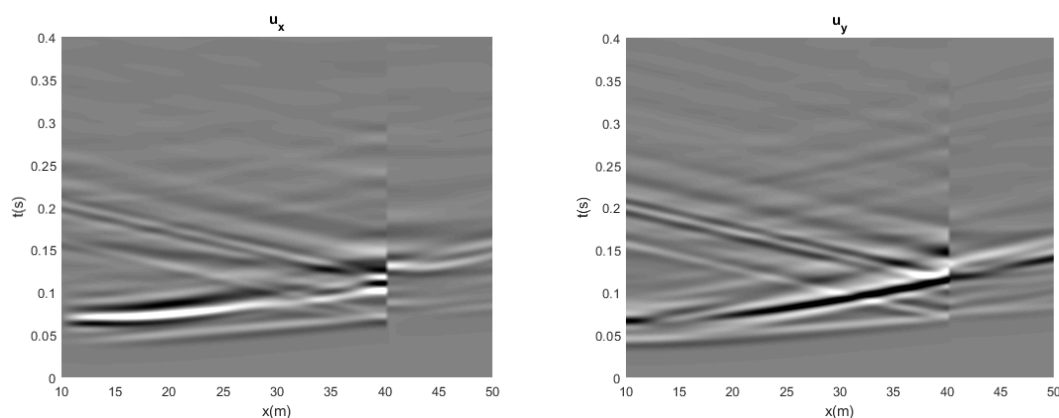


Figura 104– Deslocamentos calculados para AC\_T2\_B\_TrV\_5

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, é apresentado, na Figura 105, as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.



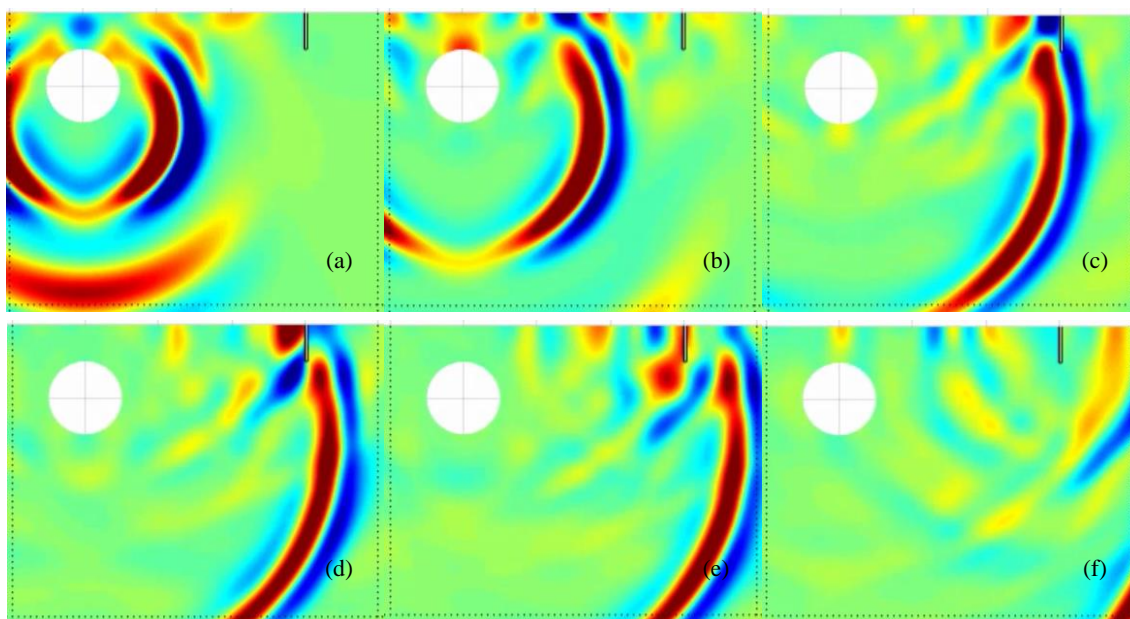


Figura 105- Propagação da onda para solo homogéneo de areia compacta com túnel de 10 m de profundidade e trincheira vazia de 5 m, sendo: (a)= 58,9 ms, (b)=76,2 ms, (c)=107,4 ms, (d)=117,8 ms, (e)=124,7 ms e (f)=152,5 ms.

Analisando a Figura 104 percebe-se uma quebra da vibração em  $x=40$  m, seguido de uma redução da amplitude da vibração, como pode ser visto na Figura 105 (c).

Em aproximadamente  $t=0,1$  s da Figura 104, verifica-se uma reflexão gerada pelo encontro da trincheira vazia, como pode ser visto na Figura 105 (f). Constata-se que para o túnel menos profundo, uma menor quantidade de vibrações passam por baixo da trincheira, garantindo uma zona protegida melhor.

#### 4.3.6.3 Solo homogéneo de areia compacta com túnel menos profundo com parede enterrada de 5 m (AC\_T2\_B\_PE\_5)

O modelo proposto neste Ponto é para um solo homogéneo de areia compacta com uma estrutura de um túnel com 10 m de profundidade e uma parede enterrada. Com recetores ao longo de toda a superfície. A esquematização desse modelo pode ser vista na Figura 106.

A carga está representada por uma seta vertical vermelha na soleira da estrutura do túnel, em  $x=10$  m e  $y=25$  m da área de estudo, desconsiderando a camada de amortecimento. O túnel está a 10 m de profundidade da superfície ao centro do túnel. O furo tem diâmetro de 10 m e o anel em betão tem espessura de 0,375 m. A parede enterrada está demonstrada em rosa e tem 5 m por 0,4 m de espessura. As cotas todas estão em metros.

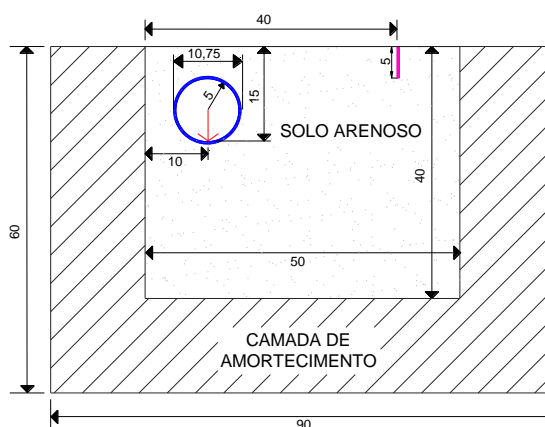


Figura 106- Representação do modelo AC\_T2\_B\_PE\_5 com cotas em metros

Pode-se visualizar os deslocamentos em cada recetor ao longo da superfície pelo tempo na Figura 107. A amplitude é marcada pela intensidade com qual a linha é apresentada para x e para y.

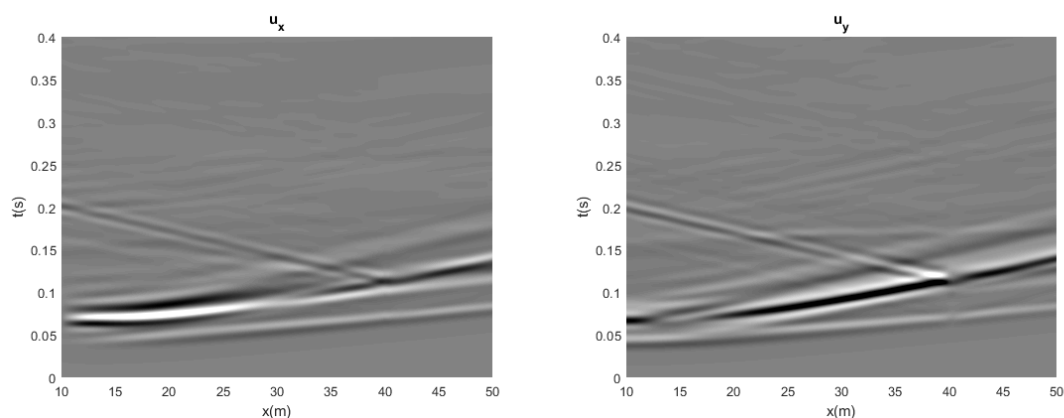


Figura 107– Deslocamentos calculados para AC\_T2\_B\_PE\_5

Para melhor compreender o que acontece na simulação do modelo, é representado, na Figura 108, as imagens da propagação das ondas em diferentes instantes temporais. O tempo correspondente a cada figura está descrito na legenda da figura.

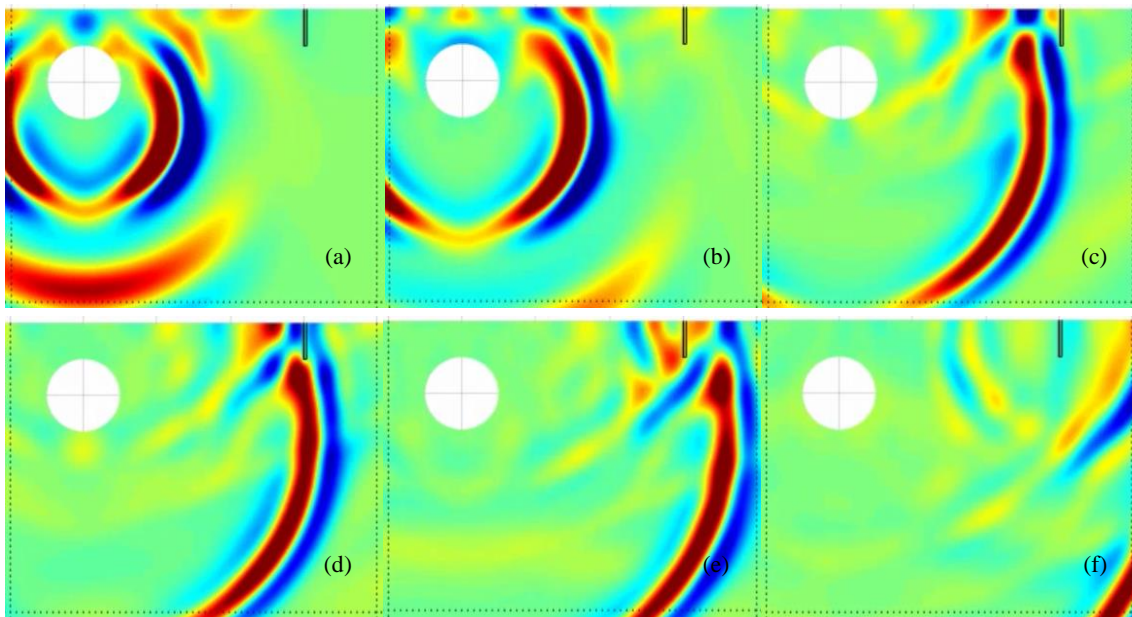


Figura 108- Propagação da onda para solo homogêneo de areia compacta com túnel de 10 m de profundidade e parede enterrada de 5 m, sendo: (a)=62,4 ms, (b)=72,8 ms, (c)=104,0 ms, (d)=114,3 ms, (e)=128,2 ms e (f)=152,5 ms.

Observa-se na Figura 107 que a parede enterrada não diminui a amplitude da vibração que chega até ela, demonstrando-se ser um método de mitigação com resultados desprezíveis. Todas as ondas que chegam a parede enterrada, continuam a serem propagadas e muitas passam por baixo, como pode ser visualizado na Figura 108 (d).

Em aproximadamente  $t=0,1$  nota-se uma reflexão gerada pelo encontro da parede enterrada, como pode ser visto na Figura 108 (f).

#### 4.3.6.4 Níveis de vibrações máximos

Os níveis de vibrações máximos ao longo do tempo para cada recetor na superfície demonstram de forma fácil quais foram os locais que tiveram maior nível de vibração em relação ao deslocamento. A análise das regiões com níveis mais críticos permitem a previsão para quais locais os métodos de mitigação serão mais requisitados. Os níveis para os modelos anteriores realizados estão representados nas Figura 109 e Figura 110. A Figura 109 demonstra os níveis máximos para a coordenada x. A Figura 110 demonstra os níveis máximos para a coordenada y.

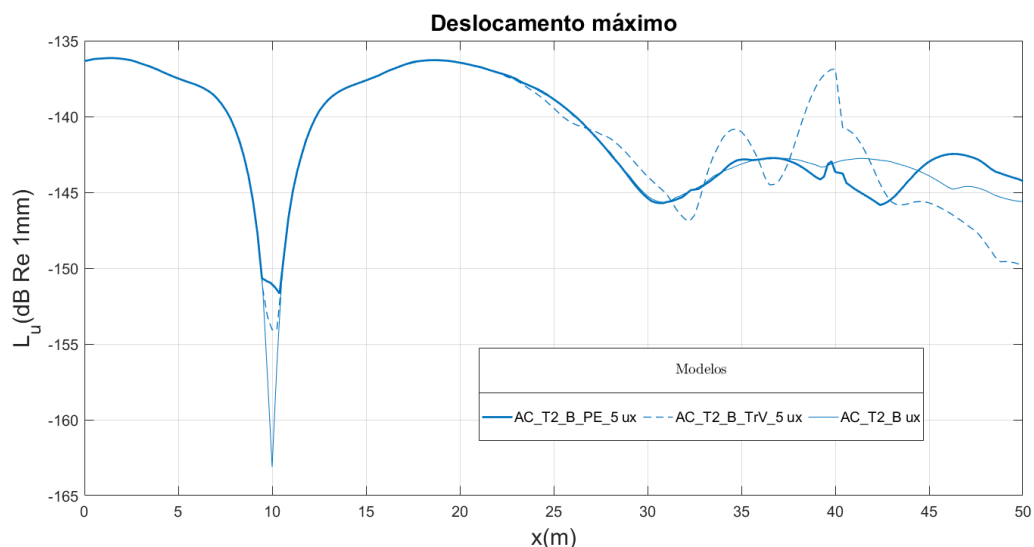


Figura 109 - Níveis de deslocamento máximo para carga em um túnel com 10 m de profundidade em x

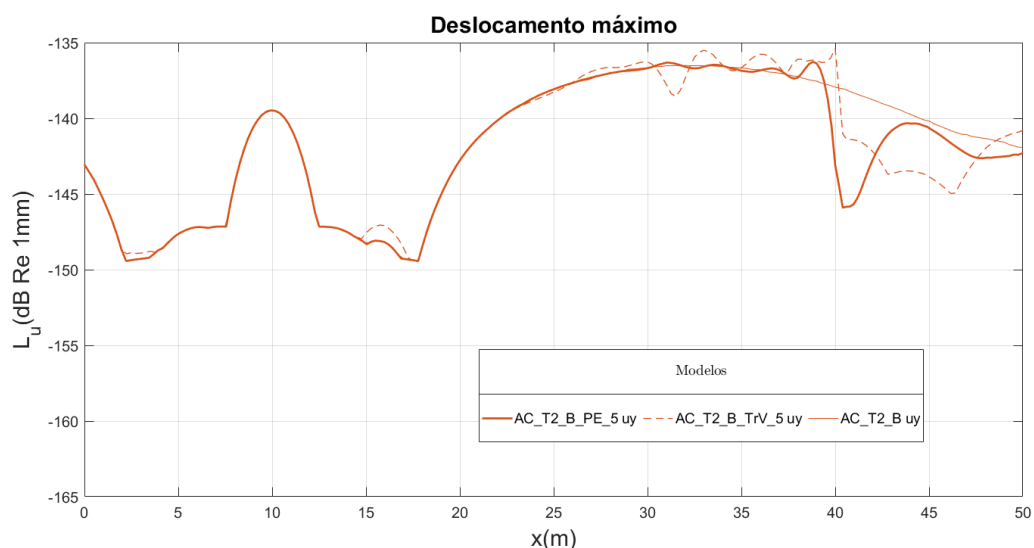


Figura 110 – Níveis de deslocamento máximo para carga em um túnel com 10 m de profundidade em y

Analisando as Figura 109 e Figura 110 pode-se perceber que a reflexão gerada pela parede enterrada não é significativa quando comparada a reflexão gerada pela trincheira vazia e o local com maior deslocamento é onde está a trincheira vazia devido as reflexões.

#### 4.3.6.5 Integral dos níveis de vibrações

O integral dos níveis de vibrações ao longo do tempo para cada recetor na superfície estão representados nas Figura 111 e Figura 112. A Figura 111 demonstra os níveis máximos para a coordenada x e a Figura 112 demonstra os níveis máximos para a coordenada y.

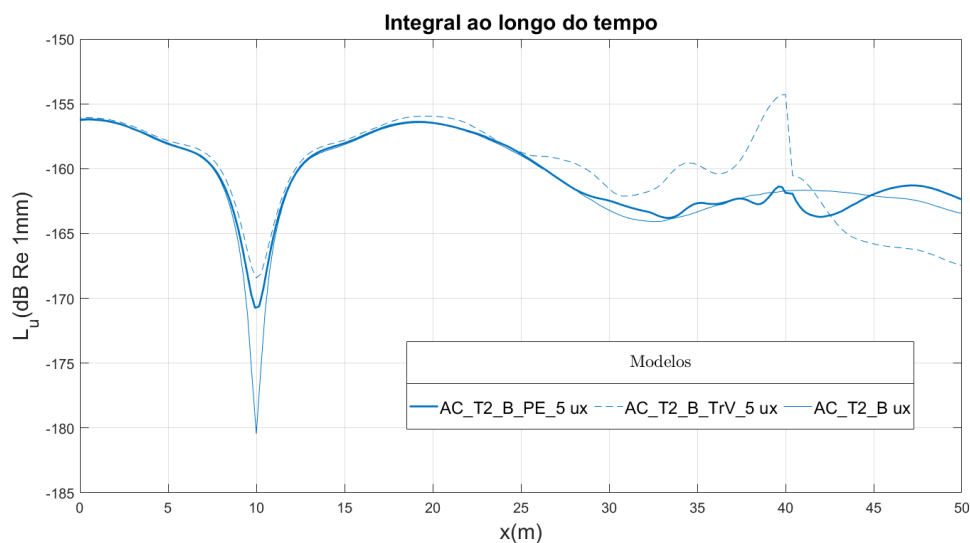


Figura 111 – Integral dos níveis de vibrações para carga em um túnel com 10 m de profundidade em x

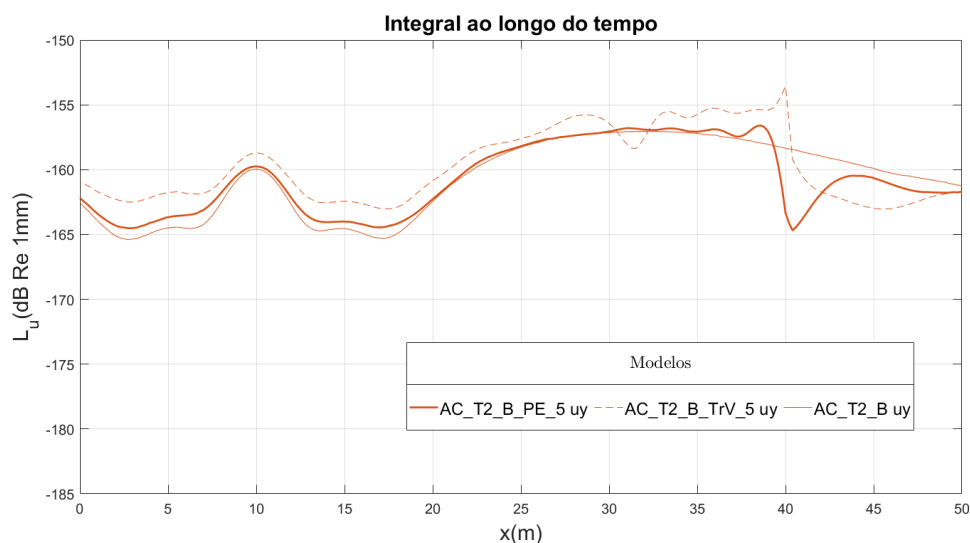


Figura 112 – Integral dos níveis de vibrações para carga em um túnel com 10 m de profundidade em y

Na Figura 112 nota-se que onde está a parede enterrada a quantidade de vibrações recebidas ao longo do tempo geram um deslocamento geral menor que para a trincheira vazia, porém essa zona protegida é muito pequena. Logo, a parede enterrada volta a receber ondas vindas por baixo acrescida das propagadas pelo material da parede enterrada, implicando em uma menor zona protegida.

Aqui nota-se que para um túnel menos profundo, em  $y=25$  m, os valores de níveis de vibrações são maiores devido a proximidade do local da carga com a superfície. Pode-se afirmar que a trincheira vazia ainda é o método mais eficaz.

#### 4.3.7 Comparação dos métodos de mitigação para diferentes locais de carga em areia compacta

Neste Ponto, compara-se os resultados obtidos para os modelos com trincheira e parede enterrada para os diferentes locais da carga. Permitindo notar quais as influências relacionadas ao local onde está a carga e a relação desse com os meios de mitigação adotados.

O primeiro método comparado será para a trincheira enterrada e depois para a parede enterrada em betão. Os locais de cargas avaliados serão para as duas posições de estrutura do túnel, uma a 20 metros de profundidade e a outra a 10 m e para a carga na superfície sobre uma placa de betão.

##### 4.3.7.1 Níveis de vibrações máximos para modelos com trincheira vazia de 5 m

Os níveis de vibrações máximos ao longo do tempo para cada recetor na superfície demonstram de forma fácil quais foram os locais que tiveram maior nível de vibração em relação ao deslocamento. Os níveis para os modelos com trincheira vazia em solo da areia compacta estão representados nas Figura 113 e Figura 114. A Figura 113 demonstra os níveis máximos para a coordenada x e a Figura 114 demonstra os níveis máximos para a coordenada y.

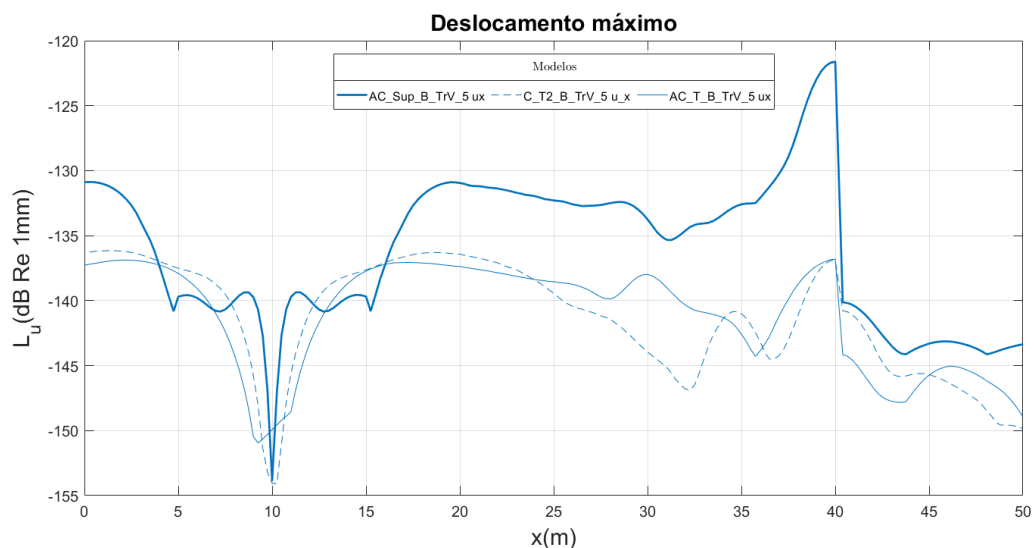


Figura 113 - Deslocamento máximo para diferentes locais de cargas com trincheira vazia em x

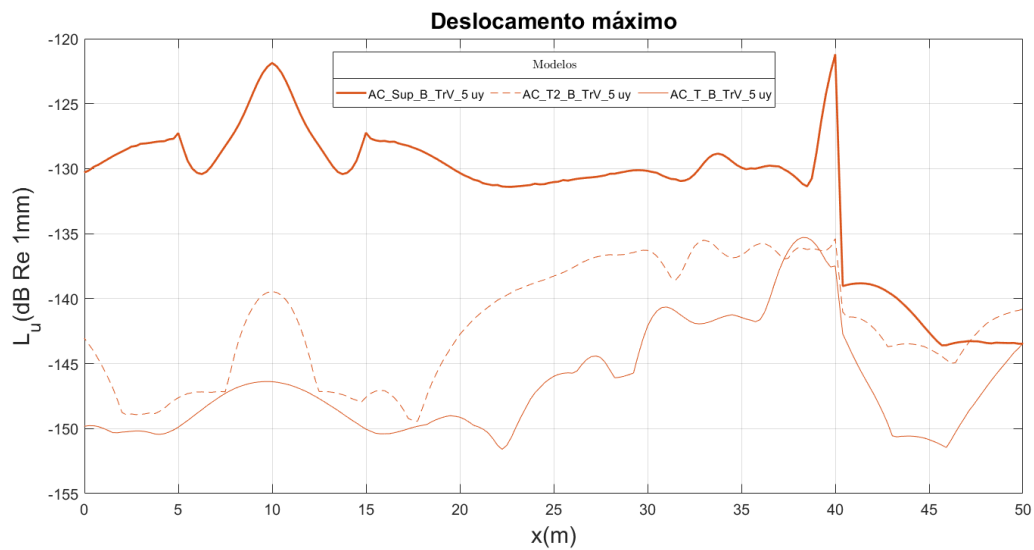


Figura 114 – Níveis de deslocamento máximo para diferentes locais de cargas com trincheira vazia em x

Observa-se que o maior nível de deslocamento máximo é para a placa de betão, como o maior decaimento abrupto também. Para a placa na superfície verifica-se que a região a direita está mais protegida pois a linha mantém-se estável devido a não ocorrer grande passagem de ondas por baixo da trincheira.

Para o túnel mais profundo verifica-se uma maior quantidade de ondas que conseguem passar por baixo da trincheira pois a partir de um certo ponto, onde acaba a zona protegida, ocorre uma elevação rápida do nível de vibração.

Os níveis máximos de deslocamento para o túnel com 10 m de profundidade (AC\_T2\_B\_TrV\_5) são maiores que para o túnel com 20 m de profundidade (AC\_T\_B\_TrV\_5), devido a proximidade com os recetores, sendo assim, as ondas chegam com maior amplitude.

#### 4.3.7.2 Integral dos níveis de vibrações para modelos com trincheira vazia de 5 m

O integral dos níveis de vibrações ao longo do tempo para cada recetor na superfície estão representados nas Figura 115 e Figura 116. A Figura 115 demonstra os níveis para a coordenada x e a Figura 116 demonstra os níveis para a coordenada y.

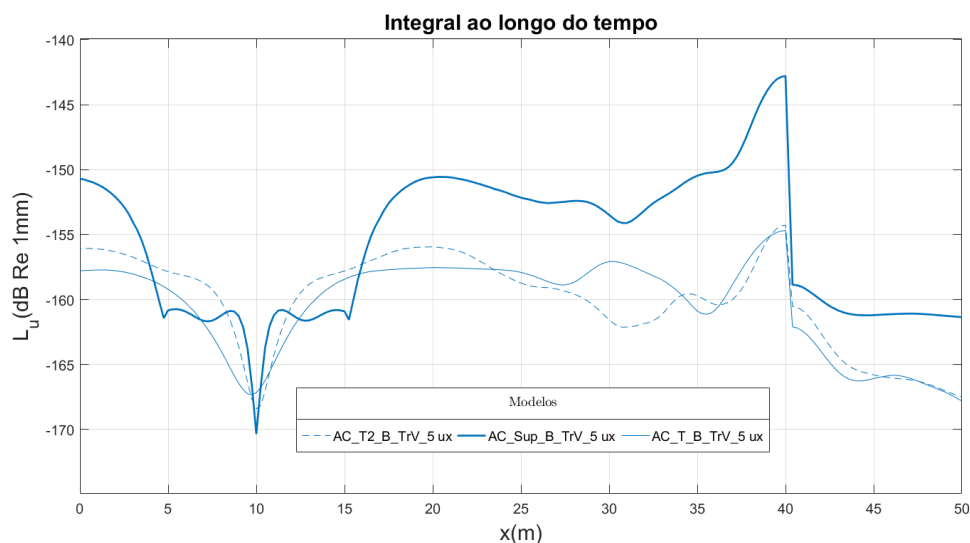


Figura 115 – Integral dos níveis de vibrações para diferentes locais de cargas com trincheira vazia em x

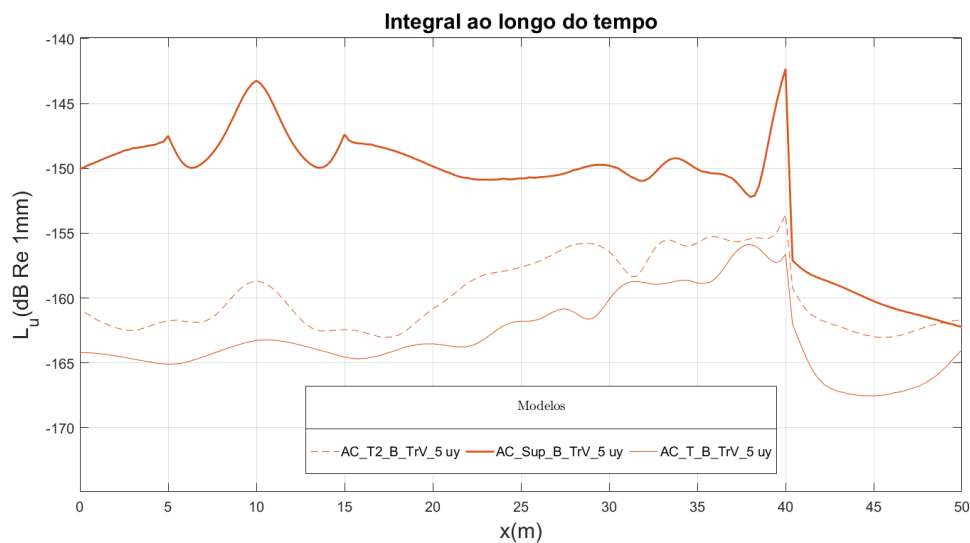


Figura 116 – Integral dos níveis de vibrações para diferentes locais de cargas com trincheira vazia em y

Verifica-se que os a vibração recebida nos modelos com a placa de betão tem níveis de vibrações maiores que para os modelos com túnel e tem o decaimento mais abrupto, facto associado a placa de betão se encontrar na superfície.

Pode-se verificar que as linhas para ambos os modelos com túnel são muito semelhantes, seguindo as mesmas tendências, com a ressalva de, como AC\_T2\_B\_TrV\_5 está mais perto da superfície, os níveis de vibrações são maiores, o que já era esperado.



#### 4.3.7.3 Níveis de vibrações máximos para modelos com parede enterrada de 5 m

Os níveis de vibrações máximos ao longo do tempo para cada recetor na superfície demonstram de forma fácil quais foram os locais que tiveram maior nível de vibração em relação ao deslocamento. Os níveis para os modelos com parede enterrada em solo da areia compacta estão representados nas Figura 117 e Figura 118. A Figura 117 demonstra os níveis máximos para a coordenada x e a Figura 118 demonstra os níveis máximos para a coordenada y.

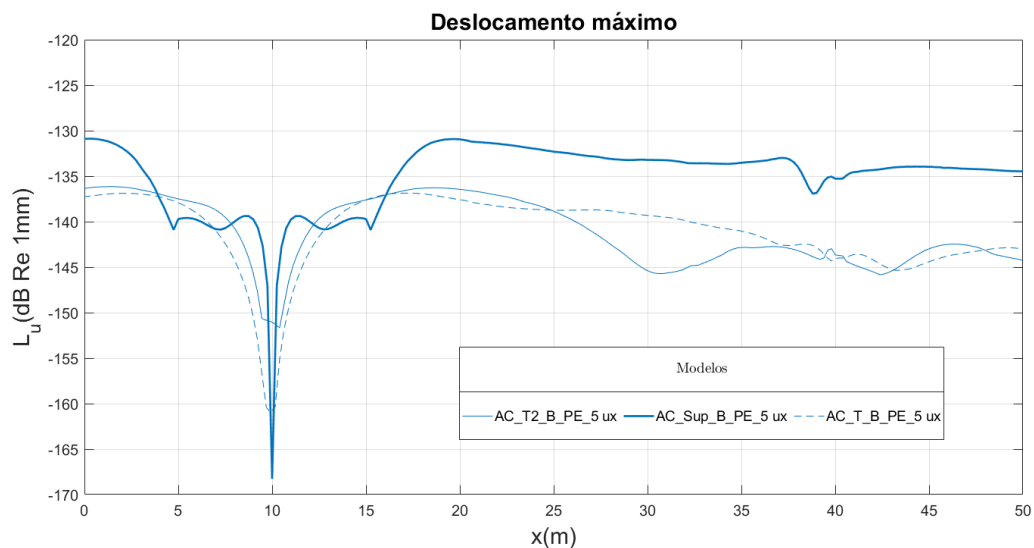


Figura 117 - Deslocamento máximo para diferentes locais de cargas com parede enterrada em X

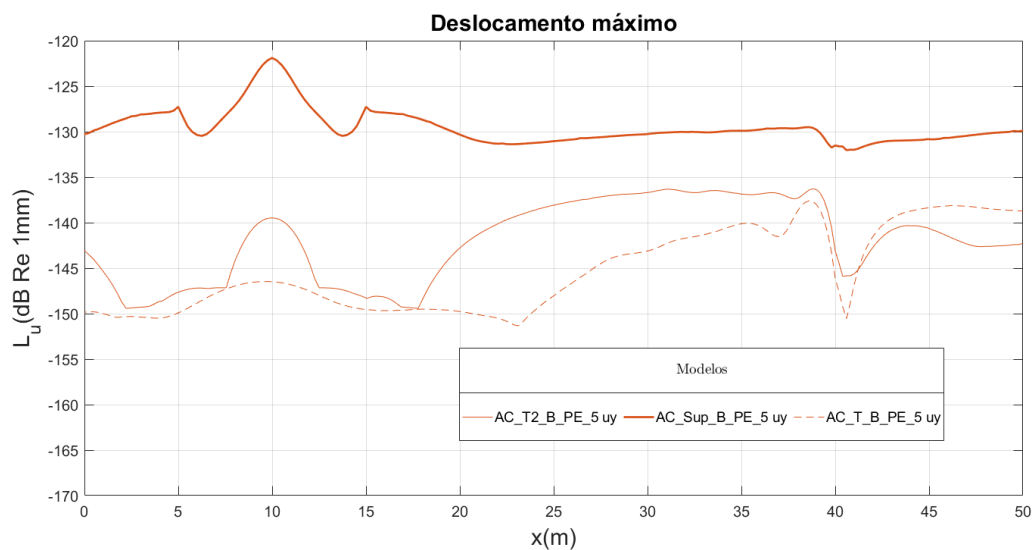


Figura 118 - Deslocamento máximo para diferentes locais de cargas com parede enterrada em X

Verifica-se que a parede enterrada é muito pouco eficiente para a placa de betão quando comparado ao uso para os modelos com túnel.

Avaliando-se todas as respostas para parede enterrada, é possível afirmar que o caso o mais indicado para este método de mitigação, seria utilizá-lo para túnel menos profundo (AC\_T2\_B\_PE\_5), pois apresenta uma zona a direita com menores níveis de vibrações associados aos deslocamentos máximos.

#### 4.3.7.4 Integral dos níveis de vibrações para modelos com parede enterrada de 5 m

O integral dos níveis de vibrações ao longo do tempo para cada recetor na superfície estão representados nas Figura 119 e Figura 120. A Figura 119 demonstra os níveis para a coordenada x e a Figura 120 demonstra os níveis para a coordenada y.

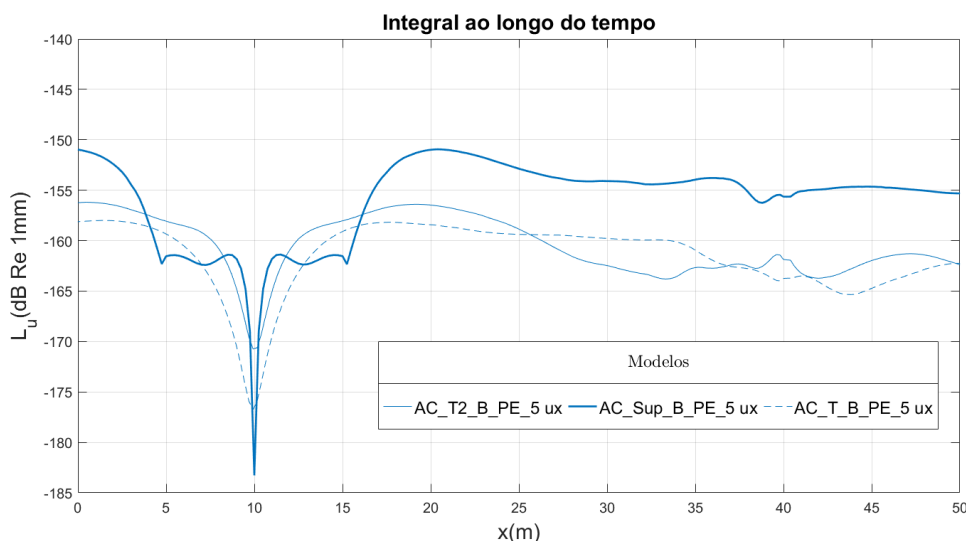


Figura 119 – Integral dos níveis de vibrações para diferentes locais de cargas com parede enterrada em x

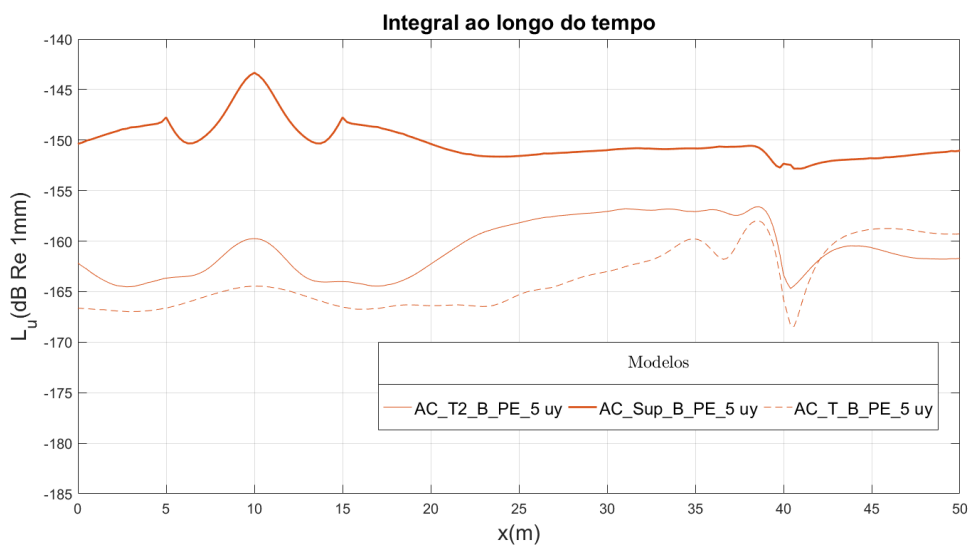


Figura 120 – Integral dos níveis de vibrações para diferentes locais de cargas com parede enterrada em y

As Figura 119 e Figura 120 apresentam resultados para as integrais dos níveis de vibrações similares ao do Ponto anterior, o que comprova o que foi analisado, a parede enterrada não é uma boa solução para a placa na superfície e é melhor utilizada para o túnel mais acima, pois apresenta uma zona protegida com melhores níveis.

## 5 CONCLUSÃO

O modelo numérico adotado neste trabalho utiliza um método de elementos finitos com marcha no tempo em 2D, com o objetivo de permitir a visualização do comportamento de propagação da onda ao longo do regime de tempo adotado (passos temporais), o que permitiu, com mais acerto, compreender as reflexões e amortecimentos junto com os gráficos gerados para os deslocamentos em  $x$  e  $y$ .

Nesse sentido, os resultados obtidos possibilitaram a comparação entre diversos modelos numéricos a partir de características distintas de solo, local de carga, bem como de diferentes métodos de mitigação, permitindo a análise do comportamento das ondas.

Nessa perspectiva, considerando a vasta quantidade de métodos atuais de mitigação da vibração, escolheu-se dois métodos de simples aplicação e mundialmente utilizados pela facilidade de execução, sendo eles os métodos da trincheira vazia e da parede enterrada em betão.

A partir da definição do modelo numérico e dos métodos de mitigação adotados, idealizou-se alguns cenários que permitissem a comparação das diferentes respostas quando alteradas algumas condições. O primeiro modelo proposto foi para solos homogêneos de areia compacta, areia fofa, argila dura, argila mole e rocha, seguido do modelo para solos heterogêneos.

O modelo para solos homogêneos permitiu a definição da camada de amortecimento, ao passo que os modelos para solos heterogêneos permitiram analisar a influência das ondas refletidas no encontro entre diferentes solos, como argila dura e rocha e areia compacta e rocha.

Ainda, propuseram-se cenários de modelos que permitissem analisar e comparar com condições diversas, a influência de uma estrutura de túnel para solo homogêneo de areia compacta em campo livre e com a trincheira vazia e a parede enterrada.

Em relação aos solos homogêneos, a fim de evitar quaisquer reflexões não desejadas, o primeiro modelo indica a camada de amortecimento mais recomendada para cada tipo de solo. Para a areia compacta, as larguras recomendadas para a camada de amortecimento são de 20 m; para a argila dura são de 12 m; para a areia fofa são de 8 m; para a argila mole é de 11 m e para a rocha é de 53 m, tendo sido estas as medidas adotadas para a realização dos modelos expostos a seguir.

O primeiro cenário apresentado para solo heterogéneo foi composto de argila dura e rocha. Buscou-se analisar a consequência do aumento do deslocamento no acréscimo de ondas, no que diz respeito as reflexões geradas pelo encontro com o solo mais profundo, - rocha- que é mais rígido e possui módulo de elasticidade muito superior ao da argila dura. Feito isto, percebeu-se que quanto menor a camada de argila dura, maior é a quantidade de reflexões tanto para x quanto para y.

O outro cenário proposto para solo heterogéneo foi o da areia compacta e rocha. Este modelo apresentou soluções parecidas com as do caso da argila dura, no entanto, considerando que o módulo de elasticidade da areia compacta é inferior ao da rocha e superior ao da argila dura, tal cenário exibiu altas velocidades de ondas e menores valores de deformação, enquanto que os resultados encontrados apresentam menor quantidade de ondas refletidas e as reflexões atingem o recetor em tempo inferior. Dessa forma, conclui-se que quanto menor a espessura da camada superior de solo menos duro, mais reflexões ocorreram, implicando em maiores deformações ao longo do tempo.

A fim de observar qual o comportamento da onda para uma estrutura de túnel, contactou-se que houve uma diminuição na deformação sofrida ao longo da superfície em comparação com os modelos em solos homogéneos.

Para além disso, percebeu-se que o anel em betão exerce um certo amortecimento na vibração, que é proporcional ao aumento da espessura do anel. Como o betão é um material mais rígido com módulo de elasticidade muito alto, em torno de 30 GPa, este mecanismo possui uma vibração menor, conseguindo amortecer as ondas que são transmitidas de forma mais rápida ao longo do anel quando comparado ao solo.

Por sua vez, a trincheira vazia quebra a propagação das ondas de vibrações que a alcançam, protegendo, assim, a área a sua direita. Isto diminui os níveis de vibrações a partir do local onde está a trincheira pois as vibrações que chegam após a direita do local da trincheira estão associadas somente as ondas de vibrações que passam por baixo. A trincheira quebra completamente a passagem da vibração, implicando em uma redução significativa.

Ademais, ressalta-se que o acréscimo da trincheira vazia gera reflexões, uma vez que, como as ondas não são transmitidas, acabam por ser refletidas, o que implica um maior nível de vibração, sentido pelo lado esquerdo da barreira.

Por isso, conclui-se que a trincheira deve ficar próxima da fonte de vibrações quando essa for superficial e mais profunda quanto possível, quando essa for um túnel. Se possível recomenda-

se colocar em ambos os lados da fonte para que evite que níveis de vibrações sejam maiores para outras regiões além da linha ou túnel devido às múltiplas reflexões.

Por consequência, pode-se afirmar que, para um túnel, a eficiência da barreira é maior conforme se aumenta a profundidade da trincheira.

Outro método de mitigação estudado foi a parede enterrada em betão. Essa, contudo, não quebra totalmente a propagação das ondas, que passam por esta com certo amortecimento relativamente pequeno, o que provoca uma zona protegida muito pequena e parte das ondas ainda são refletidas. Por outro lado, as paredes enterradas causam menos reflexões que as trincheiras vazias e quando aplicadas praticamente a face da construção garante uma mitigação da vibração que chegaria a fundação da construção.

A parede enterrada não implica grandes amortecimentos e poderia se explorar soluções alternativas a fim de garantir melhores resultados, como a ampliação da espessura da parede ou a alteração do material de preenchimento da parede enterrada. Essas alternativas de soluções não foram exploradas neste trabalho.

De forma principal, os estudos realizados neste trabalho para o comportamento da estrutura do túnel foram feitos com o solo de areia compacta. A fim de comparar os resultados encontrados para a areia compacta com um solo diferente, realizaram-se ainda modelos em solo de argila dura, outro solo duro, com módulo de elasticidade relativamente alto, mas menor que para a areia compacta. Concluindo que as ondas levam mais tempo para serem transmitidas e geram maiores amplitudes de deslocamentos.

Os resultados encontrados para os métodos de mitigação foram muito similares na argila dura, no qual existe a quebra da propagação para a trincheira vazia e um amortecimento reduzido para a parede enterrada, e ambas geram reflexões similares para o resto da área de estudo. Por isso, a parede enterrada em solo menos duro apresentar melhores resultados, mas a trincheira vazia continua sendo a solução mais eficiente.

Trocando-se o lugar da carga e colocando-a na superfície acima de uma placa de betão, para exemplificar a passagem de transportes na superfície, percebe-se que o melhor método de mitigação é definitivamente o da trincheira vazia por realizar a quebra da propagação e, como a carga é na superfície, poucas ondas passam por baixo dessa estrutura.

Com o intuito de perceber a influência da profundidade do túnel em relação à eficiência dos métodos de mitigação, a estrutura do túnel foi movida 10 (dez) m para cima, obtendo-se os

mesmos comportamentos vistos para o túnel com 20 (vinte) m de profundidade, demonstrando que a trincheira vazia é, de facto, o método mais eficiente.

À vista do exposto, a partir da comparação entre os diferentes lugares de carga, pode-se concluir que a trincheira vazia se apresenta como a solução mais viável ao caso, uma vez ao quebrar completamente as vibrações, melhor amortece a vibração em todos os cenários propostos no estudo.

Além disso, a trincheira vazia apresenta eficácia ainda maior para a placa na superfície, pois esta possui uma zona protegida bem maior e com níveis de vibrações menores, seguido pelo túnel menos profundo, uma vez que são menos vibrações que chegam por baixo da trincheira vazia, garantindo uma zona de proteção melhor e por fim para um túnel mais profundo.

De outro modo, confirmou-se que a parede enterrada é um método de mitigação pouco eficiente, devendo, quando indicado, ser utilizado para túneis menos profundos, dado que apresenta uma zona protegida com níveis menores de vibrações em comparação a carga na superfície ou ao túnel mais profundo.

Além disto, a partir do estudo de todos os modelos gerados e a comparação entre eles, é seguro afirmar que o método numérico se demonstrou altamente eficaz para ajudar a prever o comportamento de ondas, assim como para comparar soluções de mitigação e parâmetros diferentes, com o objetivo de analisar quais os melhores cenários a serem adotados para casos reais.

A partir dos resultados obtidos, conclui-se a possibilidade de expansão deste trabalho. Ampliando para o estudo do comportamento para uma carga dinâmica e levando em consideração as características do meio de transporte estudado, como carga, rugosidade das rodas, tipo de contacto entre roda e trilho. Pode-se ampliar, também, para a propagação das ondas que chegam nas fundações, percorrem as estruturas de edifícios próximos e são perceptíveis como ruído ou vibrações dentro dos quartos. Complementarmente, se possível explorar a utilização do método numérico para planos 3D, com maior discretização e para solos mais moles.

Por fim, percebe-se a necessidade de investimento em trabalhos para estudo do comportamento das ondas, quando aplicados outros métodos de mitigação no meio ou aplicados diretamente ao recetor ou a fonte.

## 6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] P. Lopes, P. A. Costa, M. Ferraz, R. Calçada e A. S. Cardoso, “Numerical modeling of vibrations induced by railway traffic in tunnels: From the source to the nearby buildings,” Vols. %1 de %261-62, pp. 269-285, 2014.
- [2] Agência Portuguesa do Ambiente, “Som, Ruído e Incomodidade,” Agência Portuguesa do Ambiente, 2020. [Online]. Available: <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=86&sub2ref=529>. [Acedido em 10 01 2020].
- [3] ISO, “ISO 14837-1:2005 Mechanical vibration — Ground-borne noise and vibration arising from rail systems — Part 1: General guidance,” Geneva, 2005.
- [4] The British Standards Institution, *BS 5228-2:2009+A1:2014 Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites. Part 2: Vibration*, BSI, 2014.
- [5] L. A. P. F. de Brito, Q. Kamimura e A. P. dos Santos, “Influência da vibração gerada pelo tráfego ferroviário no meio urbano,” *PARC*, vol. 5, nº 5, pp. 31-39, 2014.
- [6] UIC Interation Union of Railways, “Railway induced vibration. State of Art report.,” *UIC Interation Union of Railways*, 2017.
- [7] E. Ntotsios, S. Koroma, W. Hamad, D. Thompson, H. Hunt, J. Talbot e M. Hussein, “Modelling of Train Induced Vibration”.
- [8] C. Albino, L. Godinho, P. Alves Costa e P. Amado Mendes, “Effect of buried phononic crystal barriers in stratified medium,” *XI Congresso Iberoamericano de Acústica*, 2018.
- [9] A. Tadeu, D. Mateus, J. António, L. Godinho e P. A. Mendes, *ACÚSTICA APLICADA*, Coimbra, 2010.
- [10] “SISMOS Ondas Sísmicas,” [Online]. Available: [http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA5\\_Sismos/52\\_Sismologia/5203\\_OndasSismicas.html](http://w3.ualg.pt/~jdias/GEOLAMB/GA5_Sismos/52_Sismologia/5203_OndasSismicas.html). [Acedido em 01 10 2019].
- [11] C. Albino, L. Godinho, D. Dias-da-Costa e D. Soares Jr., “Ultrasonic wave propagation simulation to detect cracks in concrete structures using FEM,” vol. 48º Congresso Español de Acústica Encuentro Ibérico de Acústica, 2017.
- [12] “Conhecimento: Entenda como as ondas sísmicas se propagam,” 01 10 2019. [Online]. Available: [https://www.apolo11.com/terremotos\\_wave.php](https://www.apolo11.com/terremotos_wave.php).
- [13] A. Bedford e D. S. Drumheller, *Introduction to Elastic Wave Propagation*, Wiley, 1996.



- [14] A. Nagya, P. Fiala e F. Márki, “Prediction of interior noise in buildings generated by underground rail traffic,” *Journal of Sound and Vibration* 293, p. 680–690, 30 01 2006.
- [15] H. Agency, T. Scotland e W. A. G. a. T. D. f. R. D. N. Ireland, “Design Manual for Roads and Bridges. Volume 11. Section 3, Part 7, HD213/11: Noise and Vibration.,” 2011.
- [16] P. A. Costa, R. Calçada e A. S. Cardoso, “Track-ground vibrations induced by railway traffic: In-situ measurements and validation of a 2.5D FEM-BEM model,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 32, pp. 111-128, 2012.
- [17] Z. Zhu, L. Wang, P. A. Costa, Y. Bai e Z. Yu, “An efficient approach for prediction of subway train-induced ground vibrations considering random track unevenness,” *Journal of Sound and Vibration* 455, pp. 359-379, 18 05 2019.
- [18] D. Soares, “A novel family of explicit time marching techniques for structural dynamics and wave propagation models,” *Computer Methods Applied Mechanics Engineering* 311, pp. 838-855, 28 09 2016.
- [19] C. Albino, L. Godinho, P. A. Mendes, P. A. Costa, D. Dias-da-Costa e D. S. Jr., “3D FEM analysis of the effect of buried phononic crystal barriers on vibration mitigation,” *Engineering Structures journal* 196, 24 06 2019.
- [20] D. Thompson, J. Jiang, M. Toward, M. Hussein, E. Ntotsios, A. Dijkmans, P. Coulier, G. Lombaert e G. Degrande, “Reducing railway-induced ground-borne vibration by using open trenches and soft-filled barriers,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 88, p. 45–59, 28 05 2016.
- [21] F. Yarmohammadi, R. Rafiee-Dehkharghani, C. Behnia e A. Aref, “Design of wave barriers for mitigation of train–induced vibrations using a coupled genetic-algorithm/finite-element methodology,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 121 , p. 262–275, 26 03 209.
- [22] Y. Wang, “Frequencies of the ricker wavelet,” *Geophysics*, vol. 80, nº 2, 2015.

## ANEXO

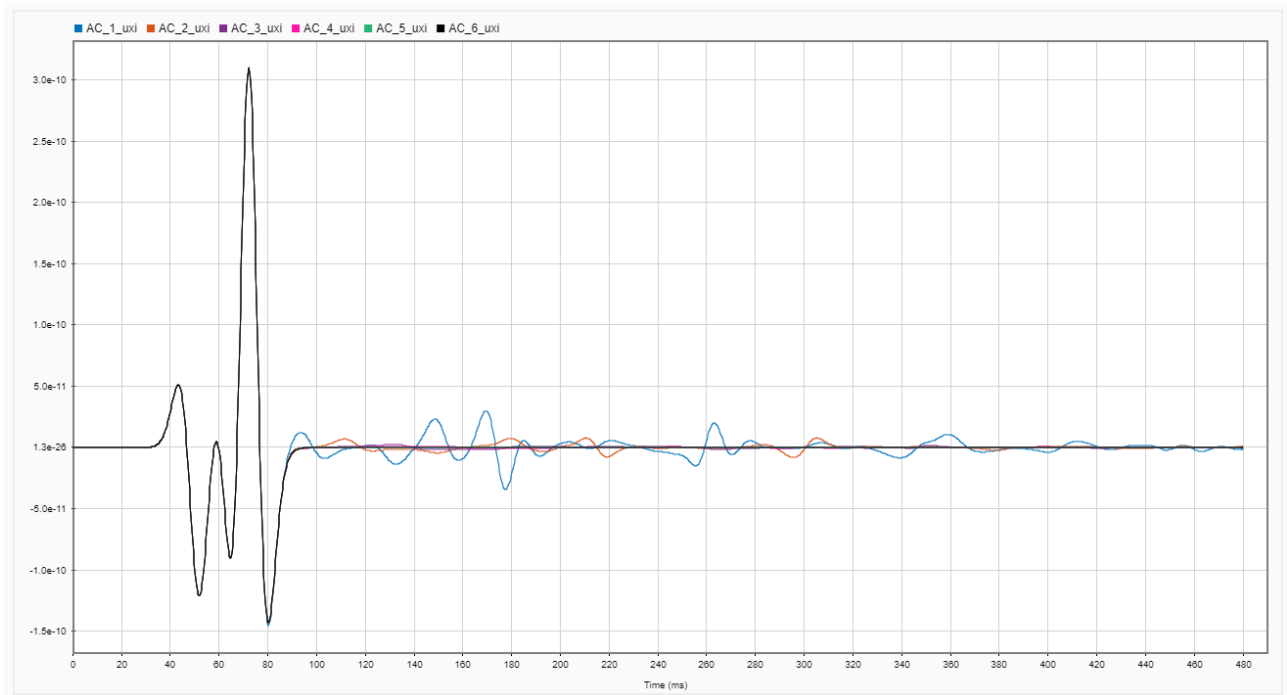


Figura A 1 – Deslocamentos calculados, em x, para a areia compacta no tempo

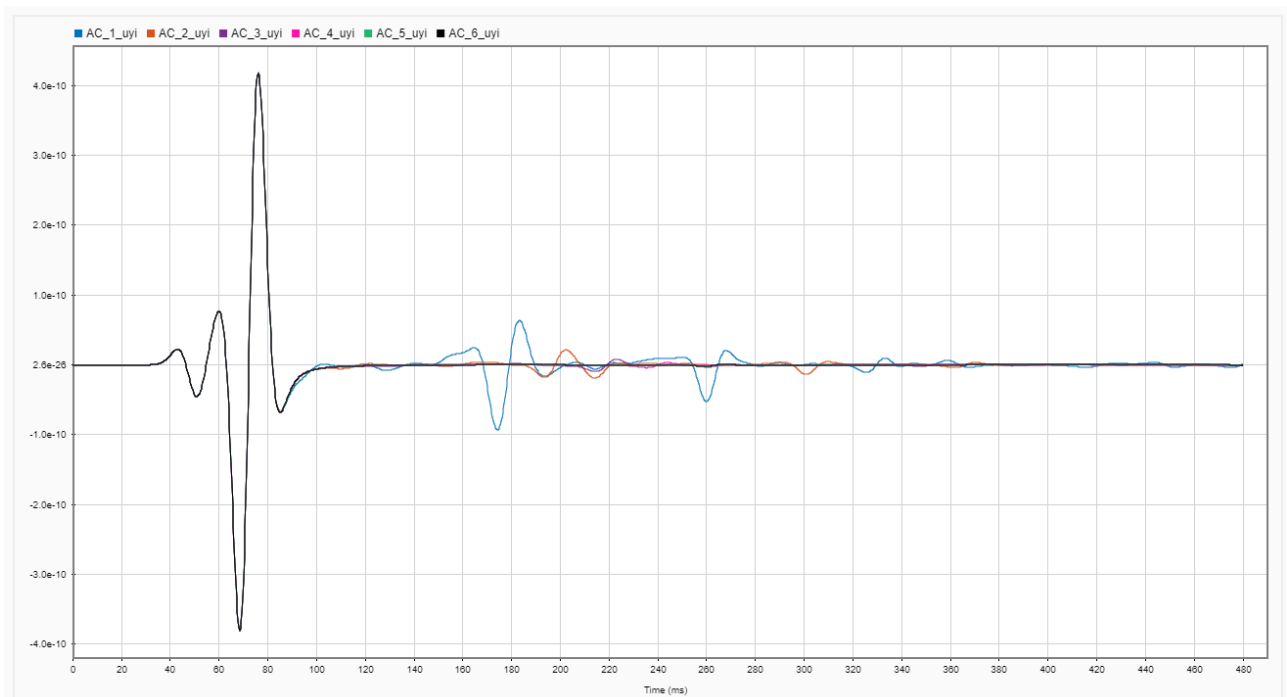


Figura A 2- Deslocamentos calculados, em y, para a areia compacta no tempo

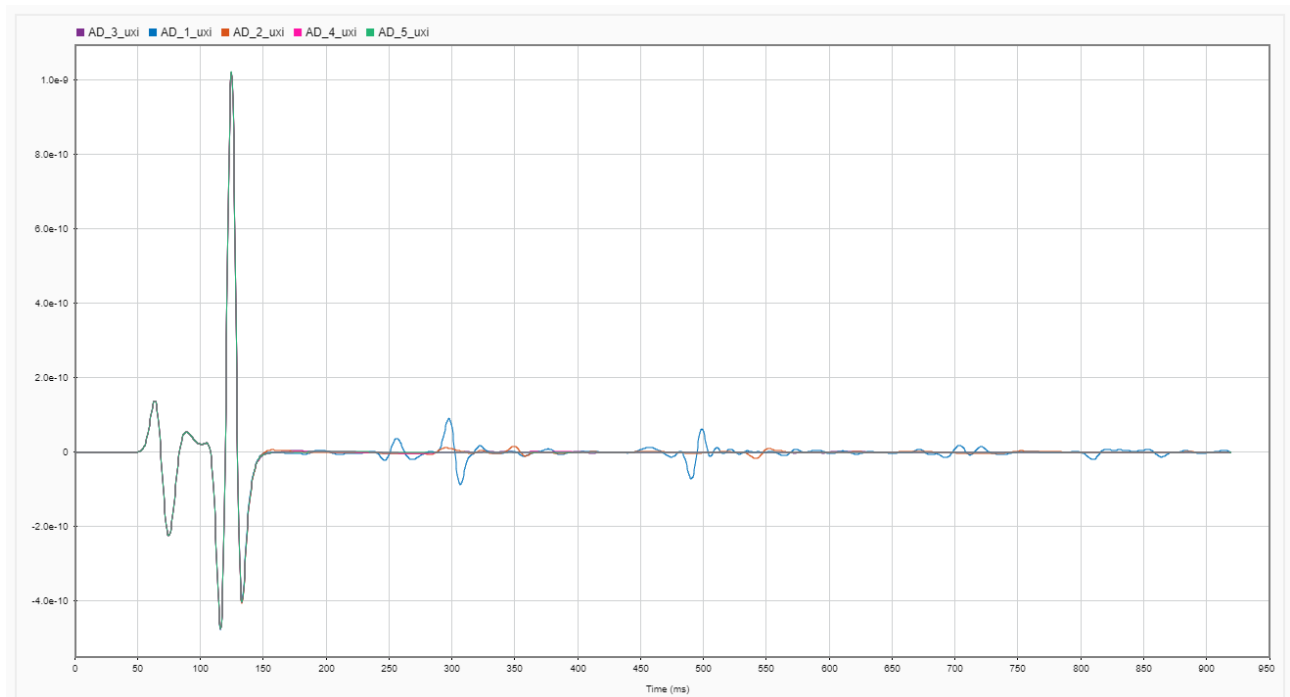


Figura A 3- Deslocamentos calculados, em x, para a argila dura no tempo

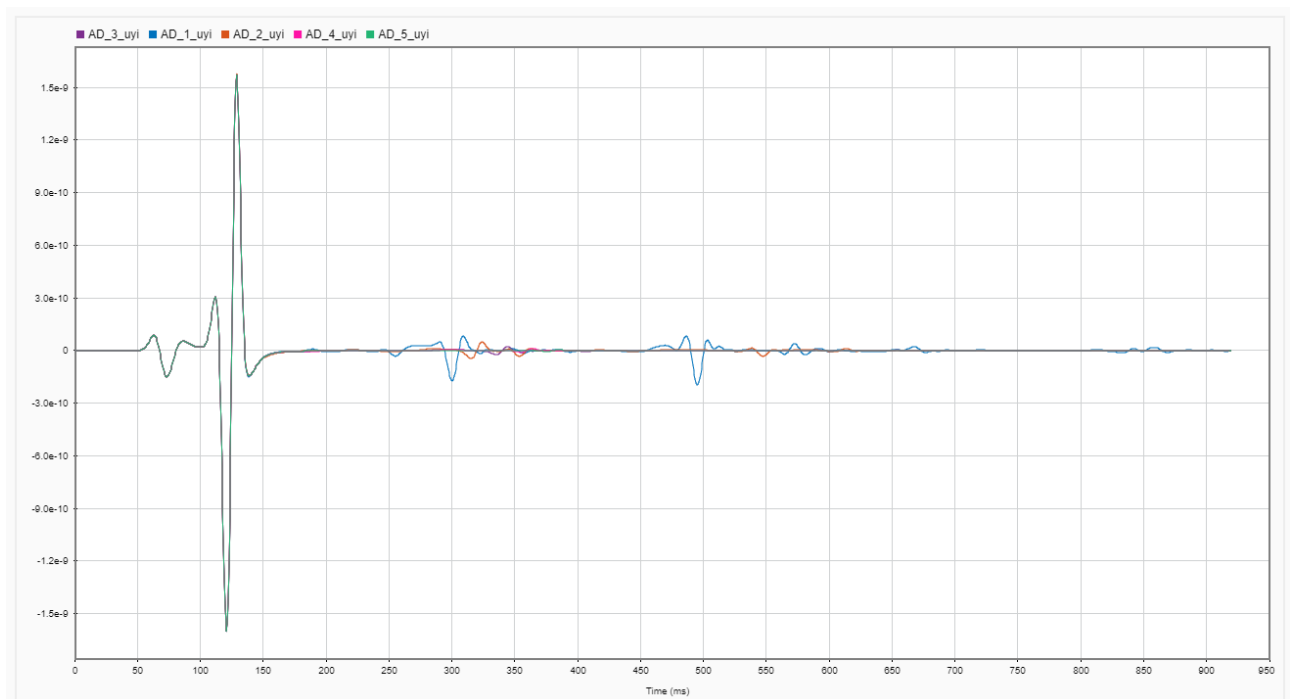


Figura A 4- Deslocamentos calculados, em y, para a argila dura no tempo

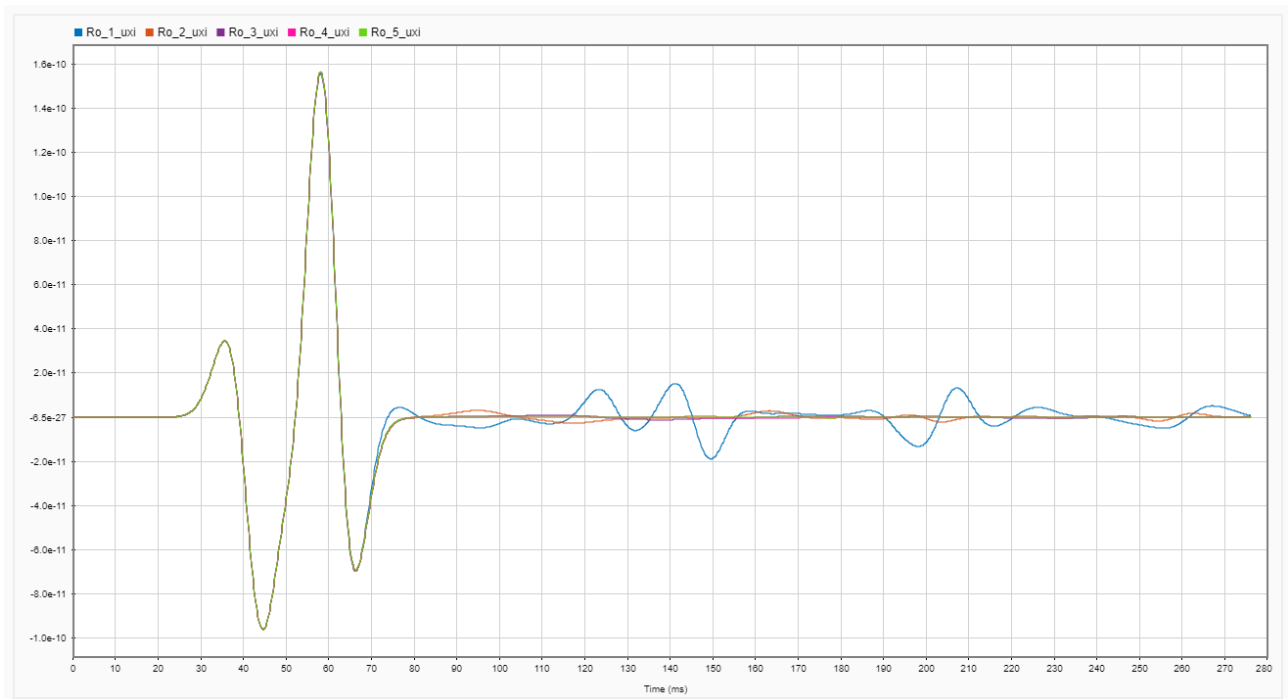


Figura A 5- Deslocamentos calculados, em x, para a rocha no tempo

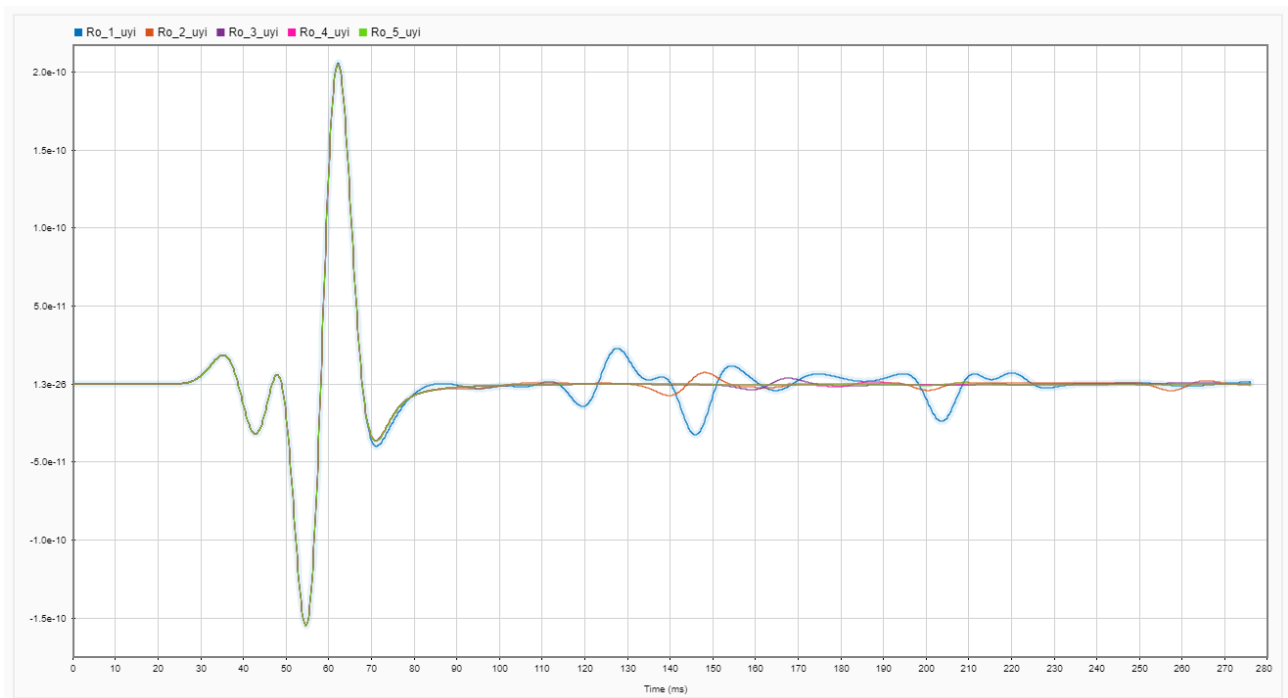


Figura A 6 - Deslocamentos calculados, em y, para a rocha no tempo

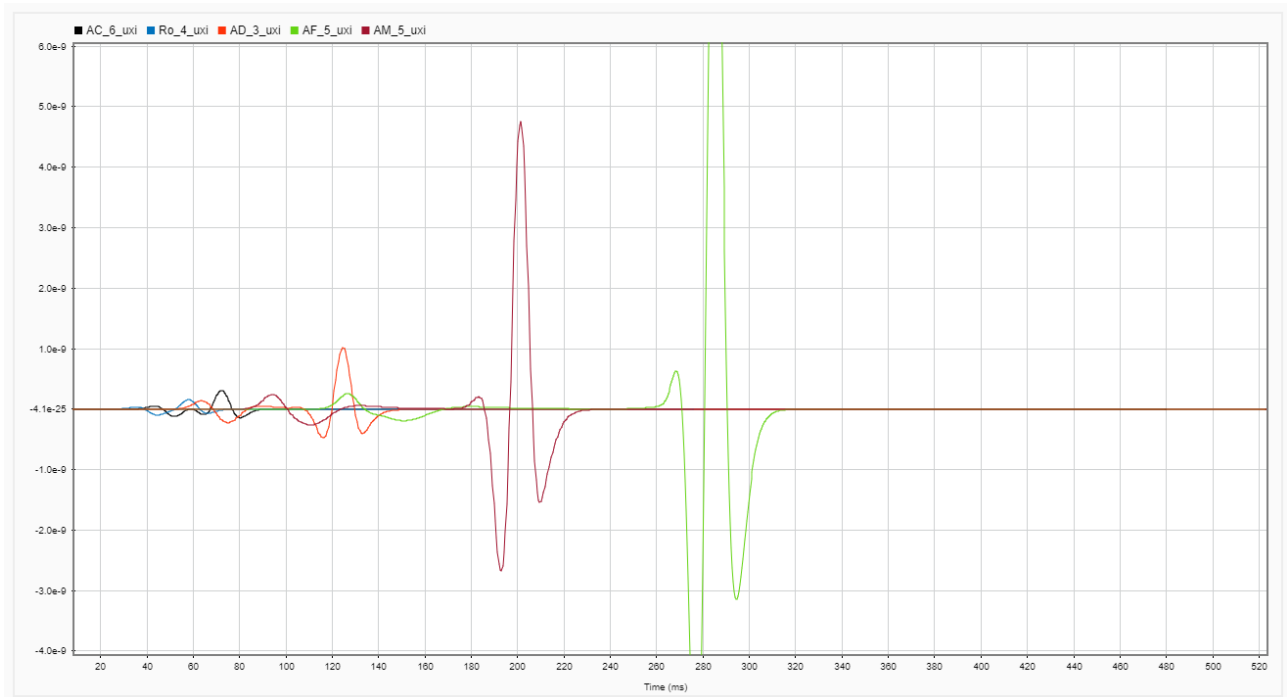


Figura A 7 - Deslocamentos calculados, em x, para todos os solos no tempo

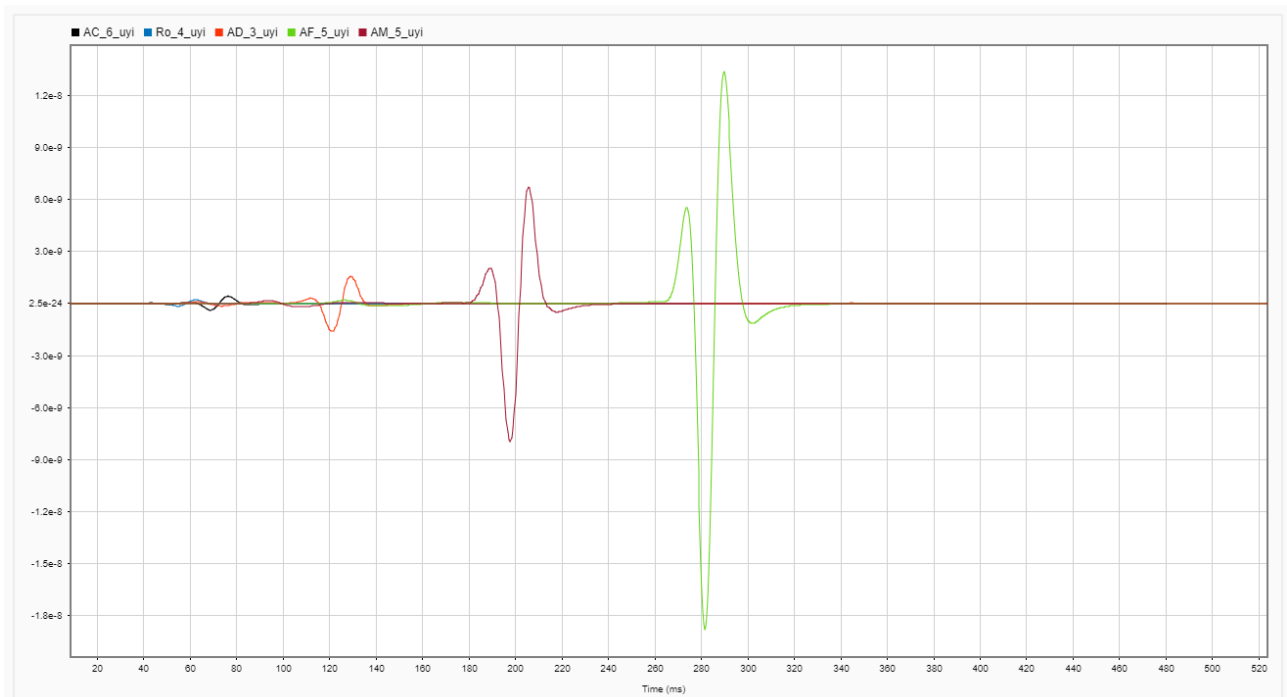


Figura A 8- Deslocamentos calculados, em y, para todos os solos no tempo

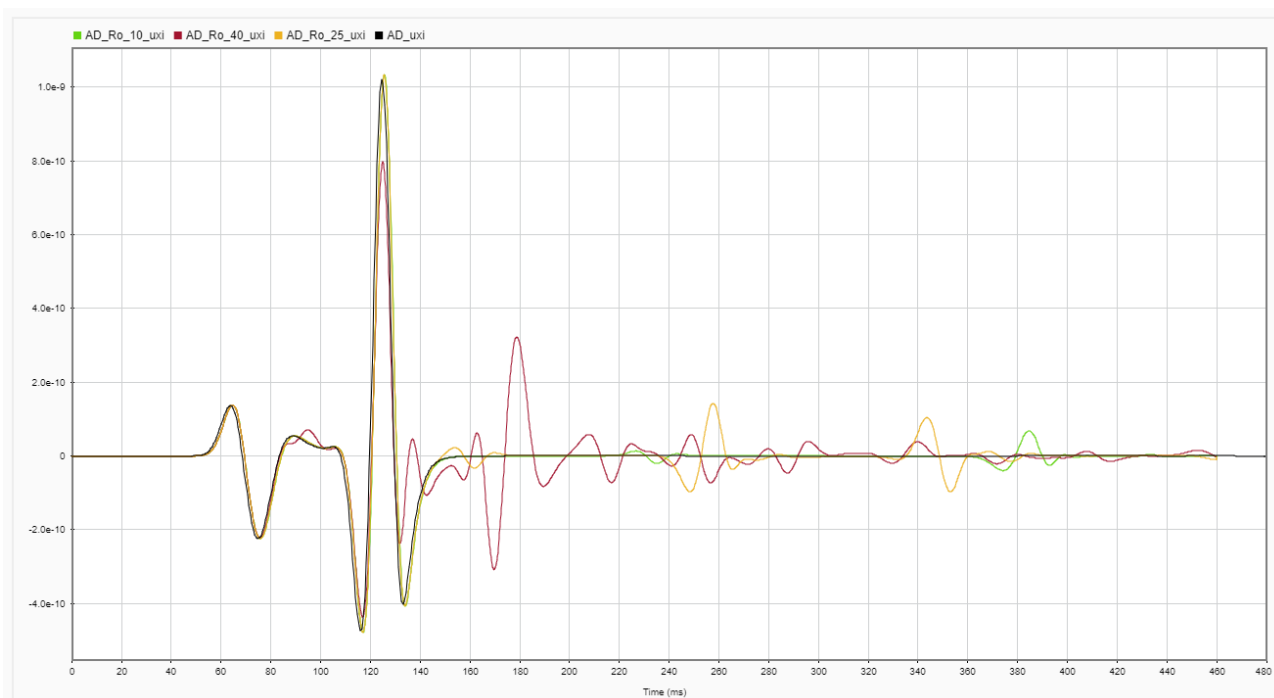


Figura A 9- Deslocamentos calculados, em x, para solo heterogêneo de argila dura e rocha

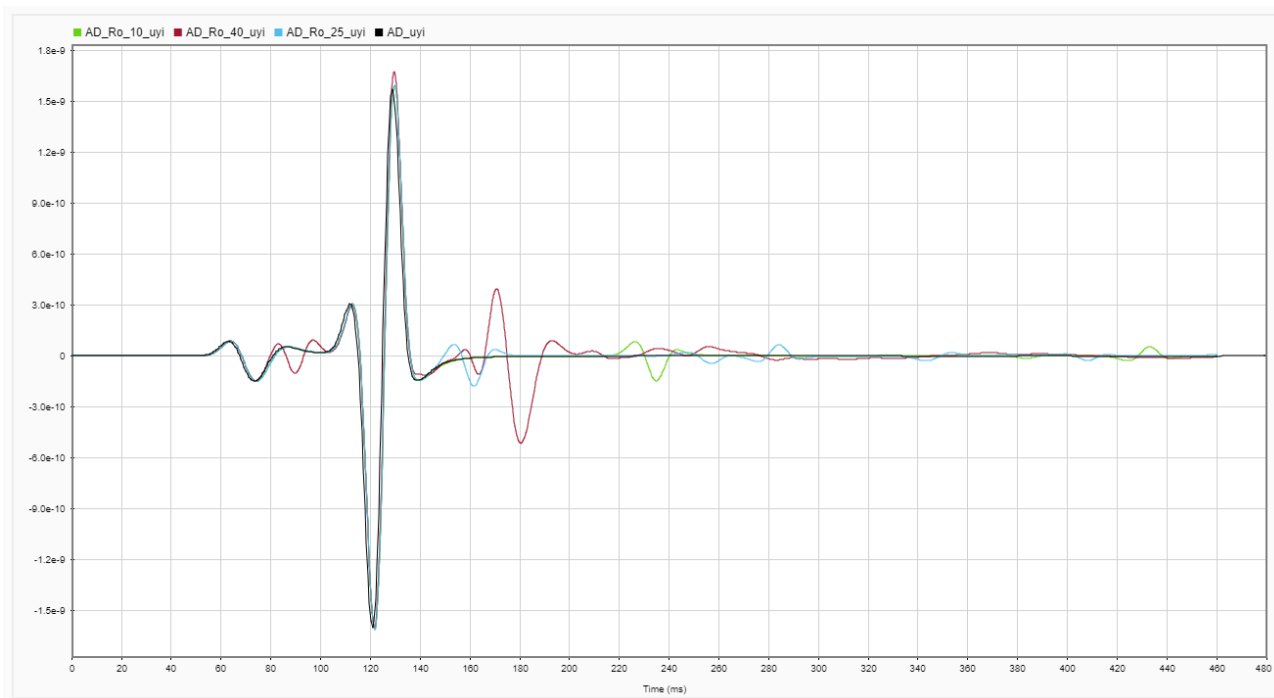


Figura A 10- Deslocamentos calculados, em y, para solo heterogêneo de argila dura e rocha

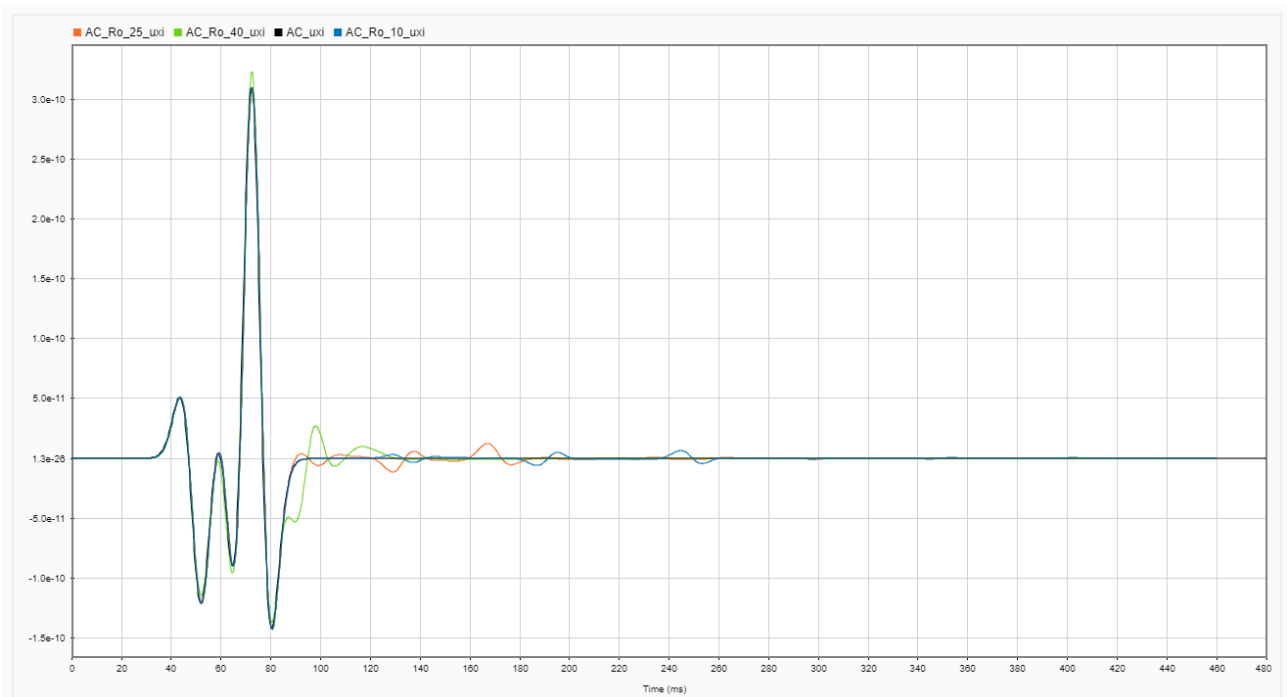


Figura A 11 - Deslocamentos calculados, em x, para solo heterogêneo de areia compacta e rocha

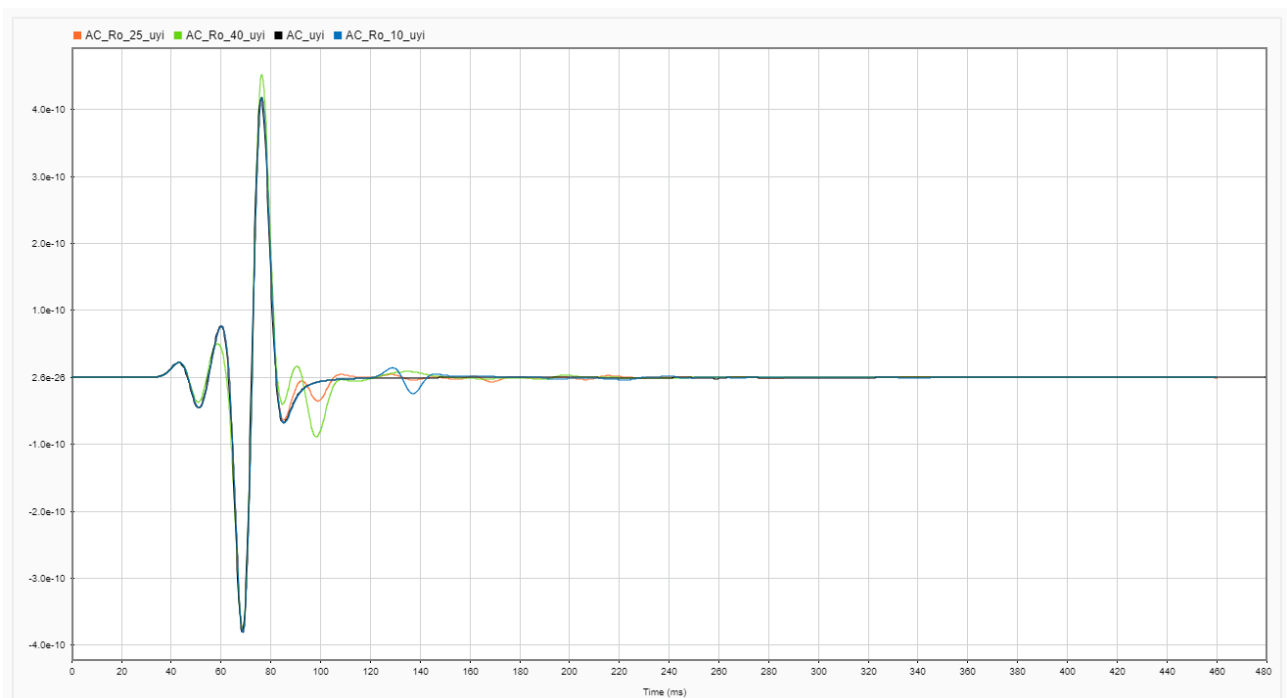


Figura A 12 - Deslocamentos calculados, em y, para solo heterogêneo de areia compacta e rocha