



**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Estudo e definição de critérios gerais de alerta e de alarme para muros de suporte e taludes rodoviários na sua fase de exploração. Casos de estudo.**

**José Rafael Pinto de Sousa**



**isep** Instituto Superior de  
Engenharia do Porto

**P.PORTO**

**2020**

(página propositadamente em branco)



## Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

### **Estudo e definição de critérios gerais de alerta e de alarme para muros de suporte e taludes rodoviários na sua fase de exploração. Casos de estudo.**

*Study and definition of general alert and alarm levels for earth retaining walls and road slopes in the exploitation stage. Case studies.*

**José Rafael Pinto de Sousa**

**1150817**

*Projeto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação do Engenheiro José Filinto Trigo, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil do ISEP e coorientação do Doutor Helder I. Chaminé, Professor Coordenador com Agregação do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

(página propositadamente em branco)

## **Júri**

### **Presidente**

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva  
*Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé  
*Professor Coordenador com Agregação, Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutor José Cândido Gonçalves Freitas  
*Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Mestre Especialista José Filinto Castro Trigo  
*Professor Adjunto, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

---

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi apresentada e defendida em prova pública, por **José Rafael Pinto de Sousa**, em 16 de Novembro de 2020 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **18 (dezoito) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

---

*Dedico esta dissertação à minha família e,  
em especial, aos meus Pais e Avós...*

(página propositadamente em branco)

## Agradecimentos

Os primeiros agradecimentos destinam-se à supervisora de estágio e aos orientadores da presente dissertação, que tiveram um papel fundamental no seu desenvolvimento. Um muito obrigado à Sra. Engenheira Alexandra Ferreira (Ascendi I.G.I.), ao Sr. Professor Engenheiro José Filinto Trigo (DEC|ISEP) e ao Sr. Professor Doutor Helder I. Chaminé (DEG|ISEP). Um sincero agradecimento pela possibilidade de desenvolver um projeto/estágio na empresa Ascendi I.G.I. e, assim, contribuírem para o ingresso no mercado de trabalho. Por todas as ideias, sugestões e desafios no âmbito deste documento; pelas várias reuniões, pela partilha de bibliografia e de conhecimentos, e ainda pela revisão das várias versões do manuscrito. Sem o vosso entusiástico apoio e dedicação este trabalho não era de todo possível. Um grande bem-haja.

Gostaria de expressar os meus agradecimentos a toda a equipa da Gestão de Conservação 2 da Ascendi I.G.I., onde foi integrado durante o período de projeto/estágio. Em especial muito grato aos colegas do Serviço de Muros e Taludes da Direção de Gestão da Conservação da Ascendi, Engenheira Adriana Neves, Engenheira Sara Sanches e Engenheiro Pedro Varela. Muito obrigado pela partilha do vosso conhecimento e pela receção e integração tão calorosa na equipa. Muito grato ainda ao Sr. Engenheiro Eduardo Mira e ao Sr. Engenheiro Alexandre Pinto (JETsj), que tiveram um papel fundamental ao longo do trabalho, nomeadamente no estudo e definição dos critérios de alerta e de alarme. Mas sem esquecer os restantes membros que constituem a equipa, um obrigado aos Srs. Engenheiros Jorge Ferreira, Manuel Ambrósio, Pedro Ramalho, Jorge Dias e Igor Rebelo, por me terem recebido muito bem na equipa e por me fazerem sentir um membro da mesma. Por fim, um muito obrigado a todos os restantes colaboradores e funcionários que englobam a Ascendi I.G.I. e com quem tive a oportunidade de interagir durante o projeto/estágio.

Um vivo agradecimento a todos os docentes do ISEP que tiveram o privilégio de interagir, durante os 5 anos, nos cursos de Engenharia Geotécnica e Geoambiente; por todos os conhecimentos, as competências, os ensinamentos transmitidos e as vivências profissionais partilhadas em sala de aula, no laboratório e no terreno.

Um obrigado a todos os Colegas que me acompanharam durante o percurso académico no ISEP e um obrigado muito especial a todos os Amigos que me ajudaram direta ou indiretamente na obtenção de uma formação académica orientada para o mundo profissional.

Por fim, mas não menos importante, um agradecimento muito especial a toda a minha família, namorada e restantes amigos (vocês foram muito importantes), pelo apoio, amizade e amor transmitido durante este período complicado para todos. Um agradecimento maior a meus Pais e Avós, pela transmissão de valores, pela compreensão na abertura de novas portas e possibilidades, e por estarem sempre presentes nos bons e menos bons momentos.

A todos, *muito obrigado!* De uma forma ou de outra todos contribuíram para a realização desta dissertação que, por esse motivo, tem um pedaço de todos vós.

(página propositadamente em branco)

**Palavras-chave**

Nível de alerta, nível de alarme, estruturas geotécnicas, monitorização, instrumentação

**Resumo**

A dissertação tem como objetivo principal o estudo e a definição de critérios gerais de alerta e de alarme para a aplicação em estruturas geotécnicas de suporte de terras e em taludes rodoviários durante a fase de exploração. Este estudo advém do facto de estes critérios não se encontrarem definidos, na fase de projeto, nos planos de observação e auscultação para um conjunto amplo de estruturas instrumentadas no grupo de Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I. No conjunto de estruturas analisadas destacam-se as seguintes tipologias: I) Muros ancorados, II) Muros de betão armado, III) Muros de terra armada, IV) Muros de gabiões, V) Taludes de aterro e VI) Taludes de escavação.

Na primeira parte são apresentadas as principais causas e consequências da instabilização de taludes, referindo-se também ações de manutenção e/ou conservação que podem ser adotadas para mitigar as ações sobre os taludes e retardar a probabilidade de ocorrências de patologias que possam originar situações de instabilização das estruturas. Ainda nesta secção são apresentados os principais métodos de monitorização e de instrumentação que se encontram disponíveis para observação e auscultação de estruturas geotécnicas.

Na segunda parte do trabalho são apresentados os níveis gerais de alerta e de alarme definidos e avaliados, com o objetivo de serem aplicados no conjunto de estruturas instrumentadas, mas que se encontram sem um plano de observação e auscultação completo.

De seguida, são apresentados os muros e taludes que foram alvo do estudo realizado e para os quais os critérios propostos serão aplicados com o objetivo de analisar e avaliar o seu comportamento ao longo da fase de exploração. No último capítulo são apresentadas as conclusões finais do trabalho desenvolvido e apresentado um conjunto de perspetivas futuras que têm como objetivo consolidar os níveis propostos.

(página propositadamente em branco)

**Keywords**

Alert level, alarm level, geotechnical structures, monitoring, instrumentation

**Abstract**

The dissertation has as main goal the study and the definition of general alert and alarm levels for the application in geotechnical structures from earth retaining walls and road slopes during its exploitation stage. This study accrues from the non-definition of these levels by the observation and auscultation plans of a wide range of instrumented structures in the group of concession and sub-concession from Ascendi I.G.I. In the set of structures, the following typologies stand out: anchored walls, reinforced concrete walls, reinforced earth walls, gabion walls, embankment slopes and excavation slopes. In the first part, the main causes and consequences of instability of slopes are presented, also referring the solution that can be adopted to mitigate the actions that act on the slope and in this way reduce the probability of them reaching instability situations. Also, in this section, the main monitoring and instrumentation methods that are available for observation and auscultation of geotechnical structures are presented. In the second part of the present work, the general alert and alarm levels are presented, with the objective of being implemented to the set of structures that have instruments but do not present a complete observation and auscultation plan. In the next chapter, the walls and slopes that were the target of the study are presented and for which the proposed levels will be applied in order to analyze and evaluate their behavior over their exploitation stage. In the last chapter, the final remarks of the work developed are made and an outlook are presented with the aim of strengthening the proposed levels.

(página propositadamente em branco)

---

## Índice

<b>1. Introdução</b> .....	<b>3</b>
1.1. Enquadramento Geral .....	3
1.2. Apresentação da Empresa Ascendi I.G.I.....	4
1.3. Objetivos .....	6
<b>2. Estabilidade de Taludes</b> .....	<b>9</b>
2.1. Principais fatores que influenciam a estabilidade de taludes.....	10
2.1.1. Causas Internas .....	13
2.1.2. Causas Externas.....	13
2.2. Tipos de Deslizamentos.....	15
2.2.1. Queda .....	16
2.2.2. Tombamento.....	17
2.2.3. Escorregamento .....	18
2.2.4. Espalhamento.....	21
2.2.5. Escoamento.....	22
2.2.6. Rotura em Maciços Rochosos .....	26
2.2.7. Síntese dos principais tipos de deslizamento.....	29
2.3. Soluções de Estabilização .....	31
2.3.1. Soluções de Proteção .....	32
2.3.2. Soluções de Correção .....	33
2.3.3. Soluções de Reforço e Contenção.....	35
2.3.4. Soluções de Alarme .....	37
2.3.5. Síntese das principais soluções de estabilização de taludes.....	38
<b>3. Monitorização e Instrumentação de Estruturas Geotécnicas</b> .....	<b>41</b>
3.1. Monitorização .....	42
3.2. Instrumentação .....	44
3.2.1. Métodos de monitorização de deslocamentos superficiais.....	47
3.2.2. Métodos de monitorização de deslocamento internos.....	49
3.2.3. Métodos de monitorização de assentamentos.....	52
3.2.4. Métodos de monitorização de deformações várias.....	54
3.2.5. Métodos de monitorização de inclinações e rotações.....	54
3.2.6. Métodos de monitorização de juntas e fissuras .....	56

---

3.2.7.	Métodos de monitorização de tensões e pressões.....	57
3.2.8.	Métodos de monitorização de grandezas relativas à água.....	59
3.2.9.	Equipamentos de medição e registo de vibrações .....	62
3.2.10.	Outros métodos de monitorização .....	63
3.3.	Técnicas e equipamentos de monitorização utilizados na Ascendi I.G.I.....	67
<b>4.</b>	<b>Níveis de Alerta e de Alarme na Fase de Exploração de Muros e Taludes .....</b>	<b>77</b>
4.1.	Critérios para a Definição de Níveis de Alerta e de Alarme para Taludes .....	80
4.2.	Critérios para o Cálculo de Níveis de Alerta e de Alarme de Muros de Contenção.....	86
4.3.	Sugestão para a Representação e Interpretação dos Critérios de Alerta e de Alarme Propostos .....	108
<b>5.</b>	<b>Casos de Estudo .....</b>	<b>119</b>
5.1.	Muros e Taludes presentes na Concessão Norte.....	120
5.2.	Muros e Taludes presentes na Concessão Grande Porto .....	122
5.3.	Muros e Taludes presentes na Concessão Costa de Prata.....	124
5.4.	Muros e Taludes presentes na Concessão Beiras Litoral e Alta.....	126
5.5.	Muros e Taludes presentes na Concessão Grande Lisboa .....	128
5.6.	Muros e Taludes presentes na Subconcessão Douro Interior .....	130
5.7.	Análise estatística da aplicação dos Critérios de Alerta e de Alarme Propostos .....	132
<b>6.</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>137</b>
<b>7.</b>	<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>145</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>.....</b>	<b>155</b>

---

## Índice de figuras

Figura 1. Grupo de Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I .....	5
Figura 2. Diferentes componentes de um deslizamento (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008) .....	10
Figura 3. Esquema do tipo de deslizamento queda (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008) ....	17
Figura 4. Esquema do tipo de deslizamento tombamento (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008) .....	18
Figura 5. Esquema do tipo de deslizamento escorregamento rotacional (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008).....	19
Figura 6. Esquema do tipo de deslizamento escorregamento translacional (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008).....	20
Figura 7. Esquema do tipo de deslizamento espalhamento lateral (adaptado de Highland & Bobrowsky, 2008).....	22
Figura 8. Esquema do tipo de deslizamento fluxo de detritos (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008) .....	23
Figura 9. Esquema do tipo de deslizamento avalanche de detritos (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008).....	24
Figura 10. Esquema do tipo de deslizamento fluxo de solo (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008) .....	25
Figura 11. Esquema do tipo de deslizamento fluxo lento de solo (adaptado de Highland & Bobrowsky, 2008).....	26
Figura 12. Esquema de uma rotura planar (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011) .....	27
Figura 13. Esquema de uma rotura em cunha (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011) .....	27
Figura 14. Esquema de uma rotura por tombamento (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011) .....	28
Figura 15. Esquema de uma rotura por encurvadura (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011). .....	29
Figura 16. Soluções de Proteção: A) – Esquema de uma vala de retenção; B) - Barreiras flexíveis; C) - Redes de Proteção; D) – Galeria de proteção (adaptado de Geobrug, 2020) .....	33
Figura 17. Esquema de reperfilamento de um talude (adaptado de Oliveira, 2010) .....	34
Figura 18. Soluções de Reforço e Contenção: A) – Betão Projetado; B) – Muro de Gabiões; C) – Muro de Betão Armado com Ancoragens; D) – Muro de Terra Armada .....	36
Figura 19. Pontos de observação: A) – Pilar solidarizado; B) – Prima e mini prisma; C) – Alvo refletor; (adaptado de Torres, 2010 e de Raposo, 2011).....	47
Figura 20. Equipamentos de observação: A) – Teodolito; B) – DEM; C) – Taqueómetro; (adaptado de Raposo, 2011).....	48
Figura 21. Esquemas representativos da implementação de inclinómetros (retirado de Torres, 2010) .....	50
Figura 22. Extensómetros: A) – Extensómetro magnético; B) – Extensómetro Incrementado; C) – Extensómetro Sondex; (adaptado de Torres, 2010 e de Rocha, 2014) .....	52
Figura 23. Equipamentos de monitorização de assentamentos: A) – Extensómetro de assentamentos; B) – Células de assentamento; C) – Réguas de nivelamento; (adaptado de Torres, 2010) .....	53
Figura 24. Extensómetro de fita (retirado de Slope Indicator, 2020) .....	54

---

Figura 25. Equipamentos de medição de inclinações e rotação: A) – Sensores de Viga; B) – Clinómetros; C) – Tiltmeter (adaptado de Torres, 2010 e de Rocha, 2014) .....	55
Figura 26. Equipamentos de monitorização de juntas e fissuras: A) – Fissurómetro “ <i>Tell-Tale</i> ”; B) - Fissurómetros de corda vibrante; (adaptado de Slope Indicator e SES, 2020) .....	56
Figura 27. Esquema de implementação de célula de carga (retirado Torres, 2010) .....	57
Figura 28. Equipamentos de monitorização de pressões: A) – Células de pressão total; B) – Estações de pressão; (adaptado de Slope Indicator, 2020) .....	58
Figura 29. Equipamento de monitorização de grandezas relativas à água: A) – Infiltrómetro de Guelph; B) – Pluviómetro; (adaptado de Torres, 2010) .....	60
Figura 30. Piezómetros: A) – Piezómetro Casagrande; B) – Piezómetro de corda vibrante; C) – Piezómetro pneumático (adaptado de Rocha, 2014) .....	61
Figura 31. Equipamento de medição e registo de vibrações – sismógrafo (retirado de VMA, 2015) .....	62
Figura 32. Aplicação da técnica de Varrimentos Laser (retirado de Martins, 2018).....	64
Figura 33. Aplicação de VANT (retirado de GeoSensori, 2020).....	65
Figura 34. Alvos topográficos: A) – Mini Prismas; B) – Tape Target; C) – Primas de reflexão total (adaptado de Relatório de Instrumentação, 2017).....	68
Figura 35. Células de Carga Manométricas (adaptado de Relatório de Instrumentação, 2017).....	70
Figura 36. Equipamento de leitura de inclinómetro (retirado de Relatório de Instrumentação, 2017) .....	72
Figura 37. Sonda de leitura de piezómetros (retirado de Relatório de Instrumentação, 2017).....	73
Figura 38. Muros e Taludes da Concessão Norte alvo de estudo .....	120
Figura 39. Muros e Taludes da Concessão Grande Porto alvo de estudo.....	122
Figura 40. Muros e Taludes da Concessão Costa de Prata alvo de estudo .....	124
Figura 41. Muros e Taludes da Concessão Beiras Litoral e Alta alvo de estudo .....	126
Figura 42. Muros e Taludes da Concessão Grande Lisboa alvo de estudo .....	128
Figura 43. Muros e Taludes da Subconcessão Douro Interior alvo de estudo.....	130
Figura 44. Pilares chave e conjunto de atividades durante o período de exploração (adaptado de Ferreira et al., 2015a).....	138

---

## Índice de quadros

Quadro 1. Principais fatores que influenciam a estabilidade de taludes (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011) .....	15
Quadro 2. Escala de velocidade para os principais tipos de deslizamentos (Varnes, 1978).....	29
Quadro 3. Síntese dos principais tipos de deslizamento (adaptado de Varnes, 1978).....	30
Quadro 4. Síntese das principais soluções de estabilização de taludes (retirado de Matos Fernandes, 2011).....	38
Quadro 5. Níveis de alerta e de alarme propostos para Taludes de Aterro .....	81
Quadro 6. Níveis de alerta e de alarme propostos para Taludes de Escavação .....	82
Quadro 7. Níveis de Alerta e de Alarme Base para Muros Ancorados .....	86
Quadro 8. Níveis de Alerta e de Alarme Base para Muros de Betão Armado .....	87
Quadro 9. Níveis de Alerta e de Alarme Base para Muros de Terra Armada .....	88
Quadro 10. Níveis de Alerta e de Alarme Base para Muros de Gabiões.....	89
Quadro 11. Níveis de alerta e de alarme propostos para Muros Ancorados .....	93
Quadro 12. Níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Betão Armado .....	94
Quadro 13. Níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Terra Armada .....	95
Quadro 14. Níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Gabiões.....	96
Quadro 15. Sugestão para a representação dos critérios de alerta e de alarme para Muros Ancorados .....	108
Quadro 16. Sugestão para a representação dos critérios de alerta e de alarme para Muros de Betão Armado .....	109
Quadro 17. Sugestão para a representação dos critérios de alerta e de alarme para Muros de Terra Armada .....	109
Quadro 18. Sugestão para a representação dos critérios de alerta e de alarme para Muros de Gabiões.....	110
Quadro 19. Níveis de Alerta e de Alarme para as diferentes tipologias de muro definidos como percentagem de deslocamento .....	111
Quadro 20. Equações para representação dos níveis de alerta e de alarme propostos .....	115
Quadro 21. Muros e Taludes da Concessão Norte alvo de estudo.....	121
Quadro 22. Muros e Taludes da Concessão Grande Porto alvo de estudo .....	123
Quadro 23. Muros e Taludes da Concessão Costa de Prata alvo de estudo.....	125
Quadro 24. Muros e Taludes da Concessão Beiras Litoral e Alta alvo de estudo .....	127
Quadro 25. Muros e Taludes da Concessão Grande Lisboa alvo de estudo .....	129
Quadro 26. Muros e Taludes da Subconcessão Douro Interior alvo de estudo .....	131

---

(página propositadamente em branco)

---

## Índice de gráficos

Gráfico 1. Leitura de alvos topográficos na direção X.....	69
Gráfico 2. Leitura de alvos topográficos na direção Y.....	69
Gráfico 3. Leitura de alvos topográficos na direção Z.....	70
Gráfico 4. Leitura de células de carga .....	71
Gráfico 5. Leitura de inclinómetros.....	72
Gráfico 6. Leitura de piezómetros.....	74
Gráfico 7. Níveis de alerta e de alarme correspondentes a deslocamentos horizontais propostos para Taludes de Aterro.....	84
Gráfico 8. Níveis de alerta e de alarme correspondentes a deslocamentos verticais propostos para Taludes de Aterro.....	84
Gráfico 9. Níveis de alerta e de alarme correspondentes a deslocamentos horizontais propostos para Taludes de Escavação.....	85
Gráfico 10. Níveis de alerta e de alarme correspondentes a deslocamentos verticais propostos para Taludes de Escavação.....	85
Gráfico 11. Níveis de alerta correspondentes a deslocamentos horizontal base.....	90
Gráfico 12. Níveis de alarme correspondentes a deslocamentos horizontal base.....	91
Gráfico 13. Níveis de alerta correspondentes a deslocamentos vertical base .....	91
Gráfico 14. Níveis de alarme correspondentes a deslocamentos vertical base .....	92
Gráfico 15. Níveis de alerta correspondentes a deslocamentos horizontais propostos .....	97
Gráfico 16. Níveis de alarme correspondentes a deslocamentos horizontais propostos .....	98
Gráfico 17. Níveis de alerta correspondentes a deslocamentos verticais propostos.....	98
Gráfico 18. Níveis de alarme correspondentes a deslocamentos verticais propostos .....	99
Gráfico 19. Deslocamentos horizontais experimentados por Muros Ancorados .....	100
Gráfico 20. Deslocamentos verticais experimentados por Muros Ancorados.....	101
Gráfico 21. Deslocamentos horizontais experimentados por Muros de Betão Armada .....	101
Gráfico 22. Deslocamentos verticais experimentados por Muros de Betão Armada.....	102
Gráfico 23. Deslocamentos horizontais experimentados por Muros de Terra Armada .....	102
Gráfico 24. Deslocamentos verticais experimentados por Muros de Terra Armada .....	103
Gráfico 25. Deslocamentos horizontais experimentados por Muros de Gabiões .....	103
Gráfico 26. Deslocamentos verticais experimentados por Muros de Gabiões.....	104
Gráfico 27. Variação de carga em células de carga de muros e taludes ancorados da Concessão Norte .....	105
Gráfico 28. Variação de carga em células de carga de muros e taludes ancorados da Concessão Grande Porto.....	105
Gráfico 29. Variação de carga em células de carga de muros e taludes ancorados da Concessão Costa de Prata .....	106
Gráfico 30. Variação de carga em células de carga de muros e taludes ancorados da Concessão Beiras Litoral e Alta .....	106
Gráfico 31. Variação de carga em células de carga de muros e taludes ancorados da Subconcessão Douro Interior .....	107
Gráfico 32. Sugestão de representação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Muros Ancorados .....	112
Gráfico 33. Sugestão de representação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Betão Armado .....	112

---

Gráfico 34. Sugestão de representação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Terra Armada .....	113
Gráfico 35. Sugestão de representação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Gabiões.....	113
Gráfico 36. Sugestão de representação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Taludes de Aterros.....	114
Gráfico 37. Sugestão de representação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Taludes de Escavação .....	114
Gráfico 38. Percentagem de estruturas que apresentem níveis de alerta e de alarme definidos de projeto.....	132
Gráfico 39. Percentagem de estruturas que ultrapassaram os critérios de alerta e de alarme propostos para deslocamentos horizontais e vertais, observados por alvos topográficos.....	133
Gráfico 40. Percentagem de estruturas que ultrapassaram os critérios de alerta e de alarme propostos para variação de carga em ancoragens .....	133
Gráfico 41. Percentagem de estruturas que ultrapassaram os critérios de alerta e de alarme propostos para deslocamentos horizontais internos, observados por inclinómetros .....	134

---

## Índice de fórmulas

Equação 1. Cálculo do fator de segurança.....	11
---	----

---

(página propositadamente em branco)

---

## Índice de acrónimos ou abreviaturas

m – Metro;

mm – Milímetro;

s – Segundo;

min – Minuto;

kN – kiloNewton;

Fs – Fator de segurança;

R – Resistência;

S – Solicitações;

$\alpha$  – Inclinação da descontinuidade;

$\Psi$  – Superfície do talude;

$\Phi$  – Ângulo de atrito interno;

VANT – Veículo aéreo não tripulado;

H – Altura da estrutura;

$\delta_v$  – Deslocamentos verticais;

$\Delta\delta_v$  – Taxa de deformação verticais;

$\delta_h$  – Deslocamentos horizontais;

$\Delta\delta_h$  – Taxa de deformação horizontais;

% - Percentagem;

$\Delta P$  – Variação de carga em células de carga;

BLA – Concessão Beiras Litoral e Alta;

SDI – Subconcessão Douro Interior;

---

(página propositadamente em branco)

---

## **Capítulo I**

### **Introdução**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## 1. Introdução

### 1.1. *Enquadramento Geral*

A presente dissertação encontra-se inserida na unidade curricular “Dissertação/Estágio/Projeto” do 2º ano de Mestrado em Engenharia Geotécnica e Geoambiente do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), centrando-se na temática: *“Estudo e definição de critérios gerais de alerta e de alarme para muros de suporte e taludes rodoviários na sua fase de exploração”*.

No âmbito da realização da dissertação surgiu a oportunidade de desenvolver, em simultâneo, um estágio curricular na empresa Ascendi I.G.I., que decorreu num período 6 meses, de fevereiro a agosto de 2020.

No vasto conjunto de serviços que são desenvolvidos pela Ascendi I.G.I., o estágio foi realizado no Serviço de Muros e Taludes da Direção de Gestão da Conservação, com o objetivo principal de apoiar a equipa na implementação e estruturação dos planos de auscultação e observação das estruturas geotécnicas da rede de autoestradas operadas pela Ascendi I.G.I., assim como, na atualização de cadastro e acompanhamento de prestações de serviços e empreitadas de manutenção e reparação de estruturas.

A segurança, a sustentabilidade e a eficiência são fatores fundamentais em obras de engenharia, que após a sua planificação e conceção terão de ser alvo de um plano de observação e auscultação, com o objetivo de (ASCENDI 2019; Ferreira, 2015a,b, 2020): I) Garantir a segurança dos utentes que circulam na via e II) Evitar danos/patologias nas infraestruturas que impliquem maiores custo durante o período de exploração das mesmas. Caso contrário, como todas as estruturas geotécnicas se encontram sujeitas a ações, podem sofrer processos de instabilização que, em última análise, podem levar a sua rotura.

A aplicação de um plano de observação e auscultação, que inclui um conjunto de instrumentos e dispositivos de monitorização destinados a medir grandezas, deve ser previsto e desenvolvido durante a fase de projeto e construção, e posteriormente transitado para a fase de exploração da estrutura, num documento que deve ser elaborado pelo projetista e entregue à empresa responsável pela obra durante a sua fase de exploração (pormenores em Ferreira, 2015a,b, 2020).

No período de exploração das estruturas geotécnicas, atual fase da rede de autoestradas operadas pela Ascendi I.G.I., as preocupações fundamentais, da equipa do serviço de muros e taludes, na observação e auscultação destes ativos, fundamentam-se no controlo e validação da segurança e funcionalidade dos mesmos. As condições de segurança são verificadas a partir da interpretação e confronto dos resultados obtidos, nas campanhas anuais, em termos de deslocamentos, tensões e

---

outras grandezas, com valores previstos (níveis de alerta e alarme) que têm em conta as características da estrutura (Ferreira, 2020).

Na Ascendi I.G.I. observou-se a falta, para um conjunto expressivo de muros e taludes instrumentados, de um plano de instrumentação e observação completo, sendo os principais elementos em falta os níveis de alerta e de alarme que permitem verificar a segurança e o estado em que se encontra a estrutura (Ferreira, 2015a,b, 2020).

Com o objetivo de resolver esta lacuna e facilitar a interpretação dos resultados obtidos nas leituras da instrumentação, ao longo do estágio foram estudados, desenvolvidos e aplicados, critérios de alerta e de alarme gerais para as diferentes tipologias de estruturas geotécnicas presente no grupo de Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I.

### **1.2. Apresentação da Empresa Ascendi I.G.I.**

A Ascendi I.G.I trata-se de uma entidade vocacionada para a gestão de ativos e para a prestação de serviços de cobrança de portagens e de operação e manutenção de infraestruturas rodoviárias. Tendo como principais valores a eficiência, espírito de equipa, orientação para o cliente, inovação e ambição. Com 20 anos de experiência consolidada, a Ascendi I.G.I. é reconhecida pela sua capacidade de inovação e eficiência operacional<sup>1</sup>.

Em bom exemplo, é o desenvolvimento da plataforma SustIMS (Sistema de Gestão de Infraestruturas Rodoviárias), que permite gerir, de modo integrado e sustentável, os principais elementos de uma infraestrutura, incluindo (Ferreira, 2015a,b): I) Taludes, II) Muros, III) Pavimentos, IV) Obras-de-arte, V) Equipamentos telemáticos, entre outros ativos. Plataforma, na qual, também foram desenvolvidos alguns trabalhos durante o estágio realizado.

A Ascendi I.G.I. é uma entidade de referência no mercado em que atua, detendo participações maioritárias em 5 Concessões e 2 Subconcessão portuguesas e promovendo uma atuação integrada nos serviços que presta. As concessões onde atualmente a Ascendi I.G.I. atua, englobam (Ferreira, 2020):

- **Concessão Norte**, atribuída em julho de 1999, liga o litoral com o interior montanhoso de Portugal, até próximo da fronteira com Espanha;
- **Concessão Grande Porto**, atribuída em setembro de 2002, contorna a zona metropolitana do Porto, melhorando os acessos ao aeroporto e ao porto de Leixões;

---

<sup>1</sup> <https://www.ascendi.pt>

- **Concessão Costa de Prata**, atribuída em maio de 2000, permite a ligação entre as principais localidades do litoral a sul do Porto;
- **Concessão Grande Lisboa**, atribuída em janeiro de 2007, a autoestrada A16 permite aceder a Lisboa de Cascais e Sintra;
- **Concessão Beiras Litoral e Alta**, atribuída em abril de 2001, eixo transversal do país por onde passam milhares de toneladas de mercadorias;
- **Subconcessão Pinhal Interior**, atribuída em abril de 2010, os principais eixos desta subconcessão são a A13, que liga Tomar a Condeixa, e a A13-1, que liga Condeixa à A1;

A Figura 1 apresenta as concessões onde a Ascendi I.G.I. presta os seus serviços, mais a subconcessão do Douro Interior.

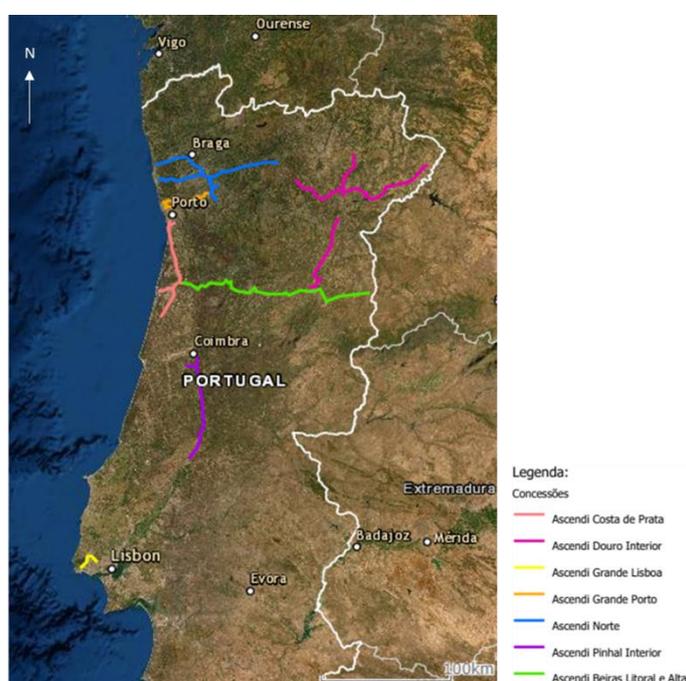


Figura 1. Grupo de Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I

No total este grupo de Concessões pelas quais a Ascendi I.G.I. é responsável, apresentando uma extensão total de 868 km, a saber: 216 Obras de Arte Especiais, 199 Nós de Ligação, 5834 Taludes, 315 Muros e 2581 Passagens Hidráulicas.

Os Serviço de Muros e Taludes da Direção de Gestão da Conservação da Ascendi I.G.I. é então responsável pela gestão e manutenção de: 1169 taludes e 106 muros que constituem a Concessão Norte, 455 taludes e 81 muros presentes na Concessão Grande Porto, 676 taludes e 38 muros presentes na Concessão Costa de Prata, 1465 taludes e 23 muros localizados na Concessão Beira Litoral e Alta, 230 taludes e 28 muros presentes na Concessão Grande Lisboa, 826 taludes e 28

---

muros localizados na Subconcessão Pinhal Interior e 1013 taludes e 11 muros que constituem a Subconcessão Douro Interior.

### **1.3. *Objetivos***

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, sendo o principal objetivo apresentar os critérios de alerta e de alarme desenvolvidos ao longo do estágio realizado e atualmente em aplicação.

A realização do segundo capítulo teve como objetivos conhecer e apresentar as principais causas e consequências da instabilização de taludes, referindo também as principais soluções que podem ser desenvolvidas para mitigar as ações a que os taludes se encontram expostos e desta forma diminuir a probabilidade de o talude atingir uma situação de instabilização.

O terceiro capítulo teve como objetivo conhecer e apresentar os principais métodos de monitorização e de instrumentação que se encontram disponíveis para a observação e auscultação de estruturas geotécnicas, referindo em que situações podem ser implementadas e as respetivas vantagens na sua utilização. Neste capítulo também é apresentado algum do trabalho realizado ao longo do estágio e os equipamentos de monitorização utilizados na Ascendi I.G.I.

No quarto capítulo são apresentados os níveis gerais de alerta e de alarme definidos e avaliados ao longo do estágio realizado na Ascendi I.G.I., com o objetivo de estes serem aplicados a muros e taludes que têm equipamentos de monitorização instalados, sem terem definidos, na fase de projeto, os níveis de alerta e de alarme a adotar na fase de exploração destas estruturas.

No quinto capítulo são apresentados os conjuntos de muros e taludes que foram alvo do estudo e para os quais serão aplicados os critérios propostos, com o objetivo de analisar e avaliar o seu comportamento ao longo da fase de exploração. No final deste capítulo é apresentada uma análise estatística referente aos resultados obtidos da aplicação dos critérios propostos.

No sexto capítulo são apresentadas e retiradas as considerações finais do trabalho realizado e apresentadas algumas perspetivas futuras relativamente aos critérios propostos.



## **Capítulo II**

### **Estabilidade de Taludes**



---

(página propositadamente em branco)

---

## 2. Estabilidade de Taludes

O presente capítulo tem como objetivos apresentar as principais causas e consequências da instabilização de taludes, referindo também as principais soluções que podem ser desenvolvidas com o objetivo de mitigar as ações a que os taludes se encontram expostos e, desta forma, diminuir a probabilidade de o talude atingir uma situação de instabilização.

Numa fase inicial deste capítulo será fundamental definir dois termos, sendo eles: I) - Talude e II) - Deslizamento. Por talude entende-se, de modo geral, uma superfície de material rochoso ou solo exposto às ações do meio ambiente, que apresenta um determinado ângulo com o plano horizontal. Um talude é constituído: - por um pé, - uma crista e - uma base, para além dos componentes atrás referidos também são ser constituídos por: - pano(s) e em alguns casos por banquetas(s). Podendo estes serem classificados de duas formas distintas, tendo por base a sua conceção, em taludes naturais e taludes resultantes de ações desenvolvidas pelo Homem.

Taludes naturais, ou vertentes, são formados através das ações conjuntas dos processos geológicos, hidrológicos e do meio ambiente, sem intervenção humana. Os fatores geológicos refletem a constituição geológica e a modelação do relevo do talude, que são posteriormente alterados por fatores ambientais, geoquímicos, geodinâmicos e hidrológicos, entre outros (e.g., Hack, 2002; Calcaterra & Parise, 2010; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Hungr et al., 2014). Além disso, os potenciais riscos naturais associados à instabilização das vertentes ou taludes naturais são aspectos a ter em consideração (González de Vallejo, 2010; Trigo et al., 2020).

Os taludes resultantes de ações desenvolvidas pelo Homem (taludes de escavação e taludes de aterro) são consequência da necessidade que o homem tem de transpor algumas barreiras naturais, que, de outro modo, seriam intransponíveis ou iriam acarretar maiores riscos ou custos caso fossem adotadas outras soluções. Taludes de escavação são todos os que resultam da escavação de maciços naturais, taludes que derivam do traçado de vias de comunicação, de canais, da exploração de minas e pedreiras e da implementação de grandes edifícios. Os taludes de aterro são construídos através de materiais recolhidos de outros locais. Existem ainda taludes mistos, que resultam da combinação de taludes de escavação e de aterro (e.g., Carvalho et al., 1991; Dinis da Gama, 1991; Bromhead, 2019).

Segundo Highland & Bobrowsky (2008), o termo *deslizamento* é usualmente utilizado para descrever o movimento do solo, de rocha e de material orgânico, sob o efeito da gravidade, e também é adotado para definir a formação geológica resultante do respetivo movimento. Existem ainda outros termos, como por exemplo movimento de massa, rotura do talude, entre outros, que são normalmente utilizados como alternativa ao termo deslizamento.

A Figura 2 demonstra a denominação utilizada para cada um dos componentes que geralmente ocorrem associados a um deslizamento.

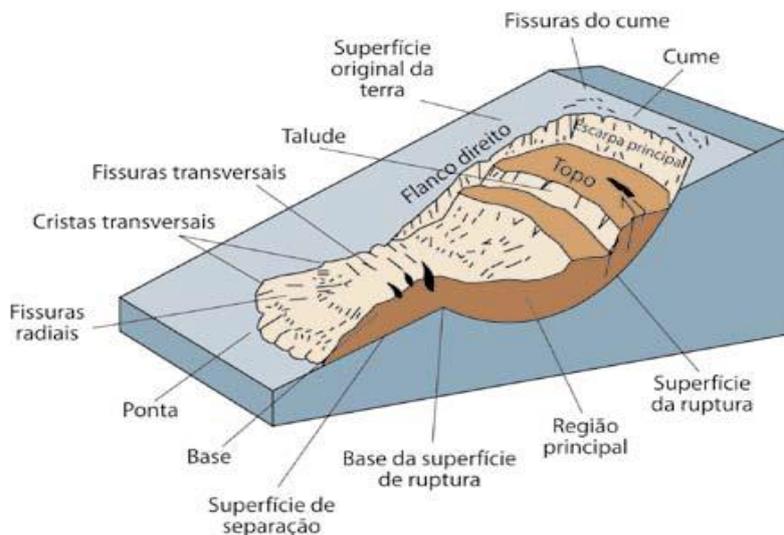


Figura 2. Diferentes componentes de um deslizamento (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)

Outra denominação geralmente utilizada para referir a base de um deslizamento é o pé e o cume, que também é geralmente mencionado como crista (Cruden & Varnes, 1996; Sandersen et al., 1996; Highland & Bobrowsky, 2008; Hungr et al., 2014).

A estes fenómenos de deslizamento, anualmente por todo o mundo, encontram-se associados elevados custos humanos, sociais e económicos, uma vez que estes podem afetar estruturas realizadas pelo homem, como, por exemplo, habitações, áreas residenciais, redes de abastecimento e vias de acesso, quer estejam implementadas diretamente sobre ou próximas do deslizamento. Uma das maiores consequências potenciais de instabilização de taludes é ao longo das vias rodoviárias e ferroviárias, podendo afetar um grande número de pessoas em todo o mundo (Highland & Bobrowsky, 2008).

Tendo em consideração a relevância e a grande importância que este tipo de estruturas apresentam, é fundamental estudar e conhecer as causas e os mecanismos que podem conduzir a um deslizamento, e apresentar soluções que podem mitigar e evitar o seu aparecimento.

### **2.1. Principais fatores que influenciam a estabilidade de taludes**

Antes de se proceder ao estudo da estabilidade de um determinado talude, é fundamental desenvolver um estudo geológico-geotécnico dos materiais que o constituem, em que se pretende avaliar as estruturas geológicas e o comportamento geomecânico dos materiais que formam o talude, conhecer fatores que possam influenciar, condicionar e desencadear instabilidades no talude e, posteriormente, definir possíveis modelos ou mecanismos de rotura que possam ocorrer

---

(e.g., Hack, 2002; Eberhardt et al., 2007; Silva, 2012; Chaminé et al., 2010a,b; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Chaminé et al., 2015; Trigo et al., 2020).

Em todas as estruturas geotécnicas existem forças que promovem os movimentos de instabilização e forças que promovem a estabilização das estruturas. O fator de segurança ( $F_s$ ) de um talude pode ser simplificadaamente definido como o quociente entre as ações estabilizadoras (Resistência –  $R$ ), ao longo de uma determinada superfície de rotura, e as tensões aplicadas sobre a mesma que promovem a instabilização (Solicitações –  $S$ ). A expressão de cálculo do fator de segurança encontra-se representado na Equação 1.

$$F_s = \frac{R}{S} \quad (1)$$

O conceito de fator de segurança é uma forma simples e útil de distinção clara entre taludes estáveis e não estáveis. O valor admissível para o fator de segurança de um determinado talude dependerá da finalidade do talude e do caráter temporário ou definitivo do mesmo, conjuntamente com aspetos de segurança, custos de execução e consequências de uma eventual rotura. Um talude é considerado estável, quando o fator de segurança é suficientemente elevado para resistir às ações que lhe são impostas. Considera-se geralmente que um fator de segurança superior a 1,5 corresponde a um talude numa situação estável. Para fatores de segurança entre 1,5 e 1,25, o talude é classificado como marginalmente estável. Para fatores de segurança entre 1,25 e 1, o talude é classificado como instável, podendo eventualmente entrar em rotura devido as forças desestabilizadoras. Taludes que apresentem fatores de segurança inferiores a 1, encontram-se em rotura (Santos, 2017).

A ocorrência de um deslizamento e/ou queda de blocos é normalmente um processo complexo que envolve um conjunto de eventos que acontecem de forma contínua, desde a sua causa até ao seu efeito, sendo geralmente difícil apontar apenas uma razão para a sua ocorrência. Parâmetros como a litologia e estrutura, as condições hidrológicas do local, a topografia e a geometria do terreno e as condições hidroclimatológicas do local, podem determinar a sua ocorrência. A combinação destes pode desencadear uma rotura ao longo de uma ou mais superfícies de deslizamento, o que induz o movimento da massa instável ou queda de blocos (e.g., Hoek & Bray, 1981; Sandersen et al., 1996; Hack, 2002; Wyllie & Mah, 2004; Hoek, 2007; Wyllie, 2014; Trigo et al., 2020).

---

As causas dos deslizamentos podem ser classificadas em dois grupos, consoante a sua função (Mendonça, 1997):

- Causas primárias, são causas que tornam o talude suscetível ao movimento, mantendo-o num estado marginalmente estável;
- Processos evolutivos, são causas que provocam o deslizamento, alterando o talude de um estado marginalmente estável para um estado instável;

Dos diferentes fatores que podem influenciar a estabilidade de um talude, a saturação do solo apresenta-se como o principal fator que pode despostrar um deslizamento, particularmente devido a períodos de intensa ou prolongada pluviosidade. Contudo, a importância e a escala deste fenómeno, estão intrinsecamente relacionadas com a topografia e com as propriedades geotécnicas dos materiais (Neves, 2015).

Outros fatores chave que podem iniciar um deslizamento são os eventos sísmicos e os eventos vulcânicos. Em zonas do mundo sísmicamente ativas e/ou vulcanicamente ativas, é possível observar que estes eventos são causas muito importantes e diretamente relacionados com a rotura de obras geotécnicas (González de Vallejo, 2010; González de Vallejo & Ferrer, 2011).

Para além dos fatores naturais que podem afetar a estabilidade de taludes, as atividades desenvolvidas pelo homem também apresentam um papel fundamental para a ocorrência de movimentos de massa. Perturbações ou alterações dos padrões de drenagem, desestabilização de encostas e remoção da vegetação são fatores comuns, induzidos pelo homem, que podem dar início a um deslizamento de terra.

Os diversos tipos de deslizamento que podem ocorrer, que no subtópico seguinte serão apresentados, refletem a diversidade de fatores e causas que podem afetar a estabilidade de um talude. As causas que afetam a estabilidade de um talude podem ser divididas em (Terzaghi, 1965):

- **Causas Internas** – ações, atuando no interior do terreno e que resultam na redução da resistência ao corte e da diminuição da resistência do material;
- **Causas Externas** – ações que atuam na face exterior do talude, que resultam no aumento das tensões de corte ao longo da superfície de rotura;

Algumas causas podem ser classificadas como intermédias, uma vez que estão associadas a ações exteriores que desencadeiam mecanismos de instabilização no interior do talude.

---

### 2.1.1. Causas Internas

O tipo de material que compreende o talude está diretamente relacionado com os tipos de deslizamento que podem ocorrer, uma vez que diferentes litologias apresentam uma suscetibilidade diferente a possíveis deslizamentos.

Os parâmetros físicos e mecânicos mais relevantes dos materiais que constituem um aterro são: I) - o ângulo de atrito e II) - coesão efetiva de solos e rochas. A tensão de corte necessária para ocorrer movimento é proporcional à tensão normal aplicada, sendo essa relação diretamente influenciada por estes dois parâmetros (Neves, 2015).

As tensões *in situ* também desempenham um papel fundamental na estabilidade do talude, principalmente quando ocorrer um alívio das mesmas devido a trabalhos de escavação. O novo estado de equilíbrio, principalmente em escavações profundas, pode ser responsável pelo desenvolvimento de tensões elevadas na base do talude e induzir deslocamentos significativos. Igualmente importante, é o conhecimento da alterabilidade dos terrenos, uma vez que a coesão diminui com o aumento do estado de alteração (Hoek, 2007).

Em taludes rochosos, a presença de descontinuidades dita a estabilidade do talude. As características físicas, geométricas e mecânicas das descontinuidades influenciam diretamente a estabilidade de taludes constituídos por material rochoso (Chaminé et al., 2010a,b; Duarte, 2017; Trigo et al., 2020).

### 2.1.2. Causas Externas

Como principais causas de instabilidade externa podem ser consideradas (Lucas, 2016):

- o aumento da inclinação dos taludes, por escavação ou por erosão; esta alteração leva ao aumento das tensões de corte perturbando o equilíbrio das tensões;
- o aumento da altura do talude, devido a escavações no pé ou aterro na crista;
- as aplicações de sobrecargas;
- a variação sazonal da temperatura e humidade, podendo originar abertura de fendas de tração;
- a ação sísmica ou as vibrações induzidas nos terrenos;
- a presença de água subterrânea;
- a erosão superficial;
- o efeito da vegetação.

---

As causas de instabilização externa mais recorrentes são as alterações geométricas do talude. As vibrações podem ser causadas por sismos, explosões ou pelo tráfego intenso. Durante um evento sísmico, o material que constitui o talude é submetido a uma série de tensões de corte que são adicionadas às já existentes. Dependendo das tensões de corte já existentes e da magnitude das novas ações cíclicas, pode ocorrer um deslizamento. Existe ainda um problema maior quando o material em questão é arenoso e se encontra saturado, situação onde pode ocorrer liquefação dos terrenos. A sobrecarga resulta em tensões de corte adicionais e o aumento das pressões de água nos vazios, o que reduz a resistência ao corte.

A erosão consiste na desagregação das formações geológicas pelos agentes de geodinâmica externa e no conseqüente arrastamento dos produtos resultantes. Muitas vezes associado a este agente há também alteração e alterabilidade dos materiais geológicos e dos maciços (Aires-Barros, 1991). Estes fenômenos podem ser observados em taludes de escavação de estradas e vias férreas, onde se formam ravinas de erosão que podem atingir profundidades consideráveis, podendo levar a instabilização da estrutura. Em taludes formados por diferentes estratos, pode ocorrer erosão diferencial o que leva à desagregação das formações mais brandas e à conseqüente instabilização da estrutura global. A erosão interna, apesar de ocorrer com menor frequência, apresenta uma grande importância para a estabilidade do talude; este mecanismo corre em estreita ligação com o regime hidrogeológico, do maciço e com a erodibilidade das formações. A erosão encontra-se frequentemente relacionada com o desmatamento, uma vez que a vegetação em taludes pode apresentar um papel fundamental, constituindo uma camada de proteção contra a erosão e na prevenção de deslizamentos. As raízes da vegetação contribuem, para o reforço e para o aumento da resistência do solo através de um aumento da coesão, promovendo ainda a absorção de água. Contudo, a vegetação também pode contribuir para a abertura de descontinuidades e árvores de grande dimensão poderão ainda causar um efeito de sobrecarga (Mendonça, 1997).

A maioria dos deslizamentos é desencadeado pela presença de água subterrânea. A água proveniente da chuva ou do degelo pode infiltrar-se no interior do talude, aumentando assim a pressão da água e, conseqüentemente, reduzindo a resistência ao corte. O congelamento de água é especialmente relevante em maciços rochosos; a água em descontinuidades expande-se quando congela e pode levar ao aumento da abertura das descontinuidades. O congelamento da água na camada superficial do solo pode impedir a drenagem, perturbando assim o equilíbrio existente (González de Vallejo & Ferrer, 2011).

O Quadro 1 apresenta uma síntese dos principais fatores que influenciam a estabilidade dos taludes.

Quadro 1. Principais fatores que influenciam a estabilidade de taludes (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011)

Ações	Fatores	Fenómenos Geológicos/Antrópicos
Aumento de solicitações	Remoção de massa	Erosão, Alteração, Alterabilidade Escavações
	Sobrecarga	Peso da vegetação Construção de Estruturas
	Solicitações dinâmicas	Sismos, Vulcanismo Desmonte, Vibrações, Tráfego
Redução da resistência	Caraterísticas inerentes ao material	Geomecânica do material-rocha Tensões
	Mudanças ou fatores variáveis	Intempéries, variação do nível freático

## 2.2. Tipos de Deslizamentos

Um deslizamento caracteriza-se por um movimento gravítico de material rochoso, de solo e vegetação, ou de uma mistura de ambos, num declive, associado à rotura ao longo de uma superfície na qual a maior parte do material se move como uma massa coerente ou semicoerente (Sandersen et al., 1996; Hack, 2002; Wyllie & Mah, 2004; Highland & Bobrowsky, 2008). A forma da superfície de rotura varia em função da resistência dos materiais presentes, sendo que tanto em solos como em rocha a rotura ocorre pela superfície de menor resistência. Em alguns casos, os deslizamentos podem envolver outros tipos de movimentos, tanto no desencadeamento da rotura como a seguir a esta (Highland & Bobrowsky, 2008).

Conhecer as características do tipo específico de risco de deslizamento é de vital importância para considerar, planejar e adotar soluções apropriadas para minimizar riscos de perdas e de danos. O tipo de deslizamento determinará (Budetta, 2004; Highland & Bobrowsky, 2008):

- a velocidade potencial do movimento;
- o provável volume de deslocamento;
- a distância de deslocamento;
- os possíveis efeitos do deslizamento;
- as medidas mitigadoras apropriadas.

---

Os deslizamentos podem ser então classificados em diferentes tipos com base no tipo de movimento que desenvolvem e no tipo de material envolvido (rocha ou solo). Geralmente, antes da ocorrência de um deslizamento são visíveis sinais que indicam uma ruptura iminente, como é o caso de fendas de tração e de elevadas deformações na superfície do talude (Highland & Bobrowsky, 2008).

### *2.2.1. Queda*

Este tipo de deslizamento desencadeia-se com a separação do solo ou da rocha, ou de ambos, de um talude com elevada inclinação, ao longo da sua superfície, na qual tenha ocorrido pouco ou nenhum deslocamento por corte. Posteriormente, o material desloca-se, principalmente por queda livre, salto ou rolamento (e.g., Budetta, 2004; Wyllie & Mah, 2004; Wyllie, 2014).

São movimentos repentinos no sentido descendente, de rocha ou de solo, ou de ambos, que se desprendem de taludes íngremes ou de penhascos. O material que desce, geralmente bate nas paredes do talude com um ângulo menor que o ângulo de queda, causando saltos. A massa em queda pode partir-se no impacto, pode iniciar outros tipos de deslizamentos em taludes mais íngremes e pode continuar até a cota mais baixa do terreno (Highland & Bobrowsky, 2008).

O volume de material em queda pode variar substancialmente, de rochas individuais ou pedaços de solo a blocos maciços com milhares de metros cúbicos. A velocidade de rolamento dos materiais depende essencialmente da inclinação do talude, mas geralmente este tipo de deslocamento é muito rápido (Highland & Bobrowsky, 2008).

Os principais mecanismos de desencadeamento deste tipo de deslizamento são a erosão conduzida por processos naturais tais como condições climatéricas agravadas, atividades humanas como escavações para construção de vias e/ou manutenção das mesmas, sismos ou outras vibrações intensas (Highland & Bobrowsky, 2008).

---

A Figura 3 apresenta um esquema de queda de material rochoso.

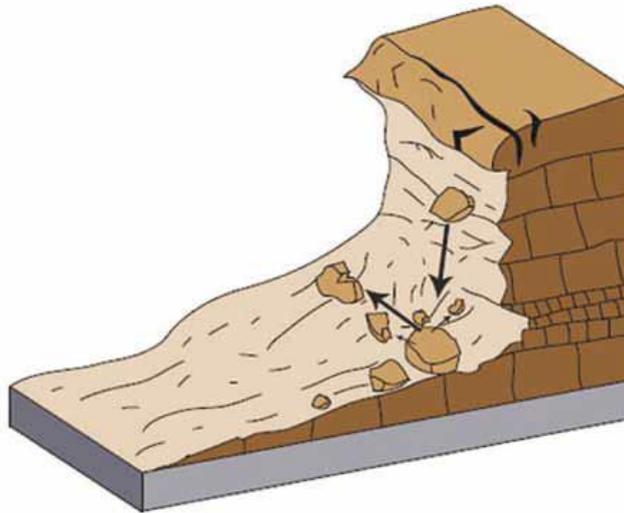


Figura 3. Esquema do tipo de deslizamento queda (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)

Este tipo de deslizamento pode danificar estruturas que se encontrem por baixo ou próximas de taludes, representando perdas económicas e, em alguns casos até, perdas humanas.

### 2.2.2. Tombamento

Um tombamento é identificado por uma rotação frontal de uma massa de solo ou de rocha para o exterior do talude, em torno de um determinado ponto, ou eixo, abaixo do centro de gravidade da massa deslocada. Tombamentos são causados, por vezes, pela gravidade exercida sobre o material que se encontra na zona superior da massa deslocada. Este tipo de deslizamento pode conter material rochoso, detritos ou solo. Podem também ser complexos e compostos (Highland & Bobrowsky, 2008).

Estes deslizamentos ocorrem com predominância em terrenos com estrutura colunar vulcânica ou em rochas sedimentares, ao longo de cortes de vias rodoviárias e cursos de rios com margens íngremes. A velocidade deste tipo de deslizamento varia entre extremamente lenta a extremamente rápida, sendo que em algumas situações ocorre o aumento da velocidade durante o movimento, dependendo das distâncias do deslocamento (Highland & Bobrowsky, 2008).

---

A Figura 4 apresenta um esquema de um deslizamento do tipo tombamento.

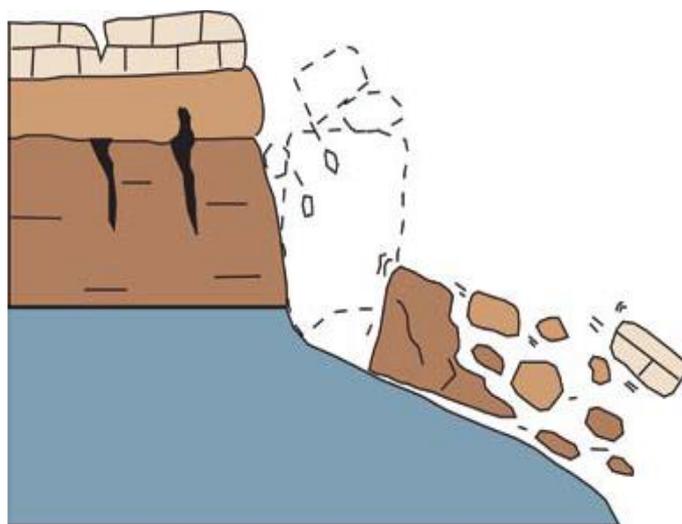


Figura 4. Esquema do tipo de deslizamento tombamento (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)

Geralmente, este movimento de deslizamento é gerado pela gravidade e, por vezes, pela presença de água ou de gelo nas descontinuidades da massa deslocada. Também podem ser iniciados por vibrações, erosão, condições climatéricas agravadas e por cursos de água. Os deslizamentos do tipo tombamento podem ser extremamente destrutivos, especialmente quando a rotura é repentina e/ou a grandes velocidades (Highland & Bobrowsky, 2008).

### 2.2.3. Escorregamento

O tipo de deslizamento escorregamento é um movimento de uma massa de solo ou de rocha, em declive, que ocorre sobre superfícies de rotura ou sobre zonas relativamente finas com intensa deformação por corte. O movimento não ocorre, inicialmente, de maneira simultânea, por toda área onde se desenvolverá a superfície de rotura. Tendo por base o tipo de superfície de rotura, este tipo de deslizamento pode ser dividido em escorregamento rotacional ou em escorregamento translacional.

Escorregamento rotacional é um deslizamento em que a superfície de rotura é curvada no sentido superior (em forma de “colher”) e o movimento de queda é mais ou menos rotacional em torno de um eixo paralelo ao contorno do talude. A massa deslocada pode, sob certas condições, mover-se de maneira relativamente coerente, ao longo da superfície de rotura e com pouca deformação interna. O topo do material deslocado pode mover-se quase que verticalmente para baixo e a parte superior pode inclinar-se para trás em direção ao talude. Se o escorregamento for rotacional e

---

possuir vários planos de movimento paralelos e curvos, apresenta a designação de abaixamento (“*slump*”) (Highland & Bobrowsky, 2008).

A Figura 5 apresenta um esquema de um deslizamento do tipo escorregamento rotacional.

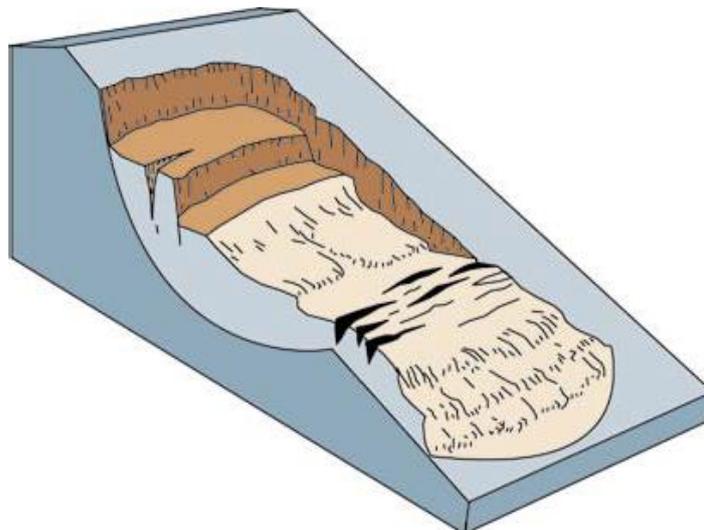


Figura 5. Esquema do tipo de deslizamento escorregamento rotacional (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)

O escorregamento rotacional é o tipo mais comum de escorregamento em aterros e ocorre com maior frequência em taludes que apresentem materiais homogêneos. Encontram-se associados a taludes com inclinações que variam entre os 20 e os 40 graus e, em solos, a superfície de rotação tem geralmente uma relação de profundidade com a extensão que varia de 0,3 a 0,1 (Highland & Bobrowsky, 2008).

A velocidade a que podem ocorrer os escorregamentos rotacionais pode variar entre extremamente lentos a moderadamente rápidos, sendo que em alguns casos pode atingir o rápido. Geralmente, este movimento de deslizamento é desencadeado por chuvas intensas e/ou por contínua ou rápido degelo que pode causar a saturação dos taludes e aumentar os níveis de água no interior do solo, podendo ser desencadeado também pela erosão na base do talude e por sismos (Highland & Bobrowsky, 2008).

Este tipo de deslizamento pode danificar muito estruturas, como vias rodoviárias, ferroviárias e redes de abastecimento, mas geralmente não representa um elevado risco para o ser humano, principalmente se o movimento for lento. Estruturas situadas sobre massas que estejam sujeitas a este tipo de movimento também sofrem danos, à medida que a massa de terreno pende e se deforma (Highland & Bobrowsky, 2008).

---

Este tipo de movimento pode ainda ser classificado em simples, múltiplo e sucessivos, tendo por base o número de escorregamentos rotacionais que ocorrem e a sua disposição.

O material que se desloca durante um escorregamento translacional move-se para fora, ou para baixo e para fora, ao longo de uma superfície relativamente plana, com pequeno movimento rotacional ou inclinação. Este tipo de deslizamento pode progredir por distâncias consideráveis se a superfície de ruptura estiver suficientemente inclinada, ao contrário do escorregamento rotacional que tende a restaurar o equilíbrio do deslizamento. O tipo de material pode variar de solo solto até grandes placas de rocha, ou ambos. Este tipo de escorregamento ocorre comumente ao longo de descontinuidades geológicas, tais como falhas, superfícies, estratificações, ou numa superfície de contato entre solo e rocha. Em certas zonas do globo, este tipo de deslizamento pode ocorrer também ao longo de camadas do subsolo que se encontram permanentemente geladas (Highland & Bobrowsky, 2008).

A Figura 6 apresenta um esquema de um deslizamento do tipo escorregamento translacional.

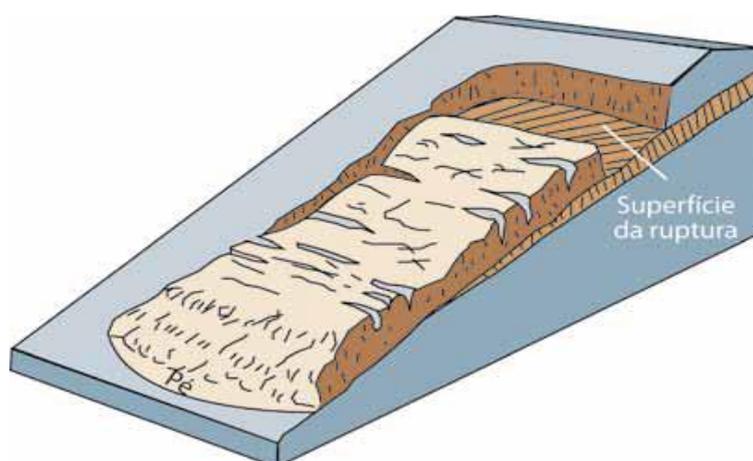


Figura 6. Esquema do tipo de deslizamento escorregamento translacional (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)

O deslizamento do tipo escorregamento translacional é um dos tipos mais comuns de deslizamento, podendo ocorrer em todos os tipos de ambiente e em diversas condições. Geralmente, são mais rasos que os escorregamentos rotacionais, sendo que a superfície de ruptura possui uma razão entre a profundidade e a extensão de menos de 0,1, podendo variar de pequena a muito grande e, em certos casos, pode ocorrer numa escala regional com quilómetros de extensão (Highland & Bobrowsky, 2008).

A velocidade deste tipo de deslizamento pode variar entre um movimento lento e um movimento com uma velocidade moderada ou extremamente rápida. Com o aumento da velocidade, a massa em movimento ou as roturas translacionais podem desintegrar-se e tornarem-se em outro tipo de

---

deslizamento por fluxo de detritos (Sandersen et al., 1996; Highland & Bobrowsky, 2008). Os principais mecanismos que podem desencadear este tipo de movimento são chuvas intensas, degelo, inundações, aumento do nível de água devido a irrigações e distúrbios causados por ações desenvolvidas pelo homem. Os sismos também podem desencadear este fenómeno.

Os escorregamentos translacionais, quando lentos, podem danificar infraestruturas, como habitações e redes de abastecimentos. Em casos em que os deslizamentos apresentam, maiores velocidades tornam-se ameaças maiores (Highland & Bobrowsky, 2008).

#### *2.2.4. Espalhamento*

Este tipo de deslizamento encontra-se geralmente associado a uma extensão de uma massa coesiva, formada por solo ou por rocha, combinada com um afundamento da superfície da massa fraturada de material coesivo numa camada inferior, de material menos rígido. O espalhamento pode ser resultado da liquefação ou fluxo do material menos rígido, podendo ser em blocos, por liquefação, e laterais (Highland & Bobrowsky, 2008).

O espalhamento lateral ocorre, geralmente, em taludes de baixa inclinação ou em terrenos planos, especialmente onde existe uma camada superior de rocha ou de solo que, ao aumentar a sua extensão, se mova para cima de uma camada menos rígida e com piores características. Nos espalhamentos de solos rochosos, a parte sólida estende-se e rompe, movendo-se, lentamente, da posição estável para cima da camada mais fraca, sem que necessariamente se forme uma superfície de rotura identificável. A camada menos rígida, em determinadas condições, pode ser espremida para cima e para dentro das descontinuidades que dividem os blocos rochosos. Em espalhamentos de solo, a camada superior estável estende-se ao longo da camada inferior mais fraca que flui, após uma liquefação ou deformação plástica. Se a camada inferior for relativamente grossa, o bloco partido da camada superior poderá afundar, virar, girar, desintegrar-se, liquefazer-se ou até mesmo fluir (Highland & Bobrowsky, 2008).

O espalhamento pode ocorrer em locais onde o solo seja passível de liquefação e em áreas de atividade sísmica. A área afetada pode ser inicialmente uma porção pequena e apresentar um conjunto de fissuras que se espalham rapidamente, afetando assim áreas com centenas de metros (Highland & Bobrowsky, 2008).

A velocidade de deslocamento deste tipo de fenómeno pode variar entre lenta e moderada e, em algumas situações específicas, rápida, após certos mecanismos de desencadeamento, tais como sismos (Highland & Bobrowsky, 2008).

---

A Figura 7 apresenta o esquema de um deslizamento do tipo espalhamento lateral.

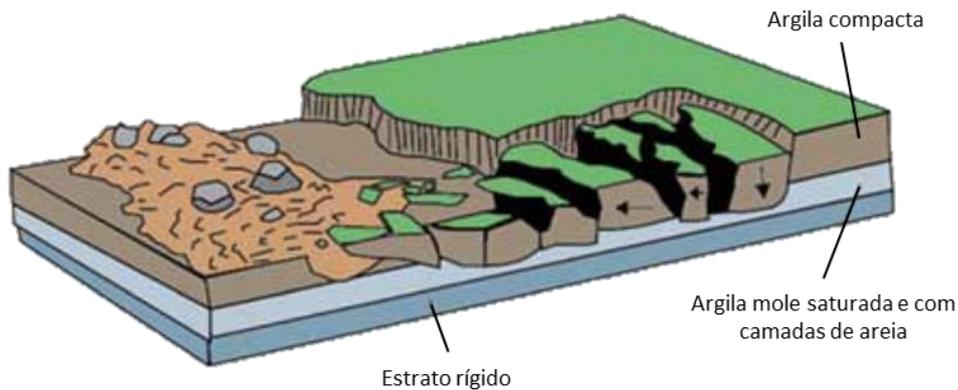


Figura 7. Esquema do tipo de deslizamento espalhamento lateral (adaptado de Highland & Bobrowsky, 2008)

Os mecanismos que podem desestabilizar a camada menos rígida e, conseqüentemente, desencadear este tipo de deslizamento, incluem (Highland & Bobrowsky, 2008):

- Liquefação da camada inferior com características inferiores, devido à agitação causada por um sismo;
- Sobrecarga do solo, acima do terreno instável, por causas naturais ou por atividades antropogénicas;
- Saturação de uma camada subterrânea mais mole devido a precipitação, degelo e/ou alteração dos níveis de água no solo;
- Deformação plástica de material instável e profunda;

Os espalhamentos podem causar danos graves a infraestruturas, como habitações, estradas, ferrovias e redes abastecimento. Este tipo de deslizamento pode ser um precursor de um outro tipo de deslizamento, como os escoamentos de solo.

#### 2.2.5. Escoamento

Os escoamentos caracterizam-se por um movimento espacialmente contínuo, no qual as superfícies de corte têm espaço reduzido entre si e não são preservadas. A velocidade com que a massa se desloca num escoamento é semelhante à de um líquido viscoso. Com alguma frequência, dependendo da quantidade de água e da evolução do movimento, pode ocorrer uma mudança gradativa de um escorregamento para um escoamento (Highland & Bobrowsky, 2008).

---

O fluxo de detritos é um movimento de massa que ocorre de forma rápida, em que solo e rochas, e, por vezes, material orgânico, se misturam com a água e formam uma lama que escoo pelo talude abaixo. Ocasionalmente, quando um escorregamento rotacional ou translacional ganha velocidade, e a massa interna perde a coesão ou ocorre um aumento da quantidade de água presente, esse fenómeno pode alterar-se para um deslizamento do tipo fluxo de detritos. Escoamentos sem presença de água podem ocorrer em areias não coesivas, denominados como escoamentos arenosos (Highland & Bobrowsky, 2008).

A Figura 8 apresenta um esquema de um deslizamento do tipo fluxo de detritos.

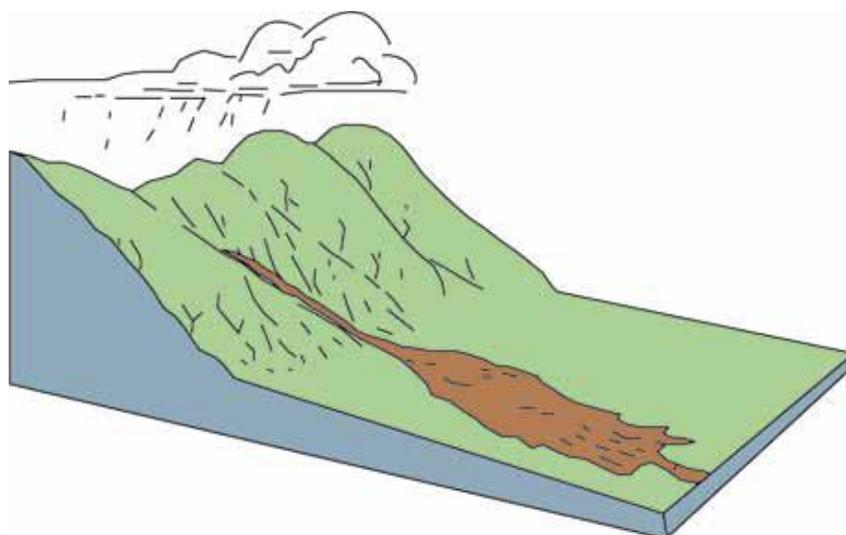


Figura 8. Esquema do tipo de deslizamento fluxo de detritos (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)

Este tipo de deslizamento pode ocorrer mais intensamente em taludes onde a vegetação tenha sido destruída por incêndios ou queimadas, ou onde a vegetação foi indevidamente cortada. Este tipo de escoamento pode ser aquoso ou espesso, com sedimentos e detritos. São geralmente limitados pela dimensão dos taludes em que ocorrem e o escoamento é longo e estreito, estendendo-se por quilómetros em terrenos inclinados. Os detritos e as lamas são encontrados na base do talude e geram depósitos triangulares e cónicos (Highland & Bobrowsky, 2008).

A velocidade deste tipo de fenómeno pode variar entre rápida a extremamente rápida, dependendo da consistência do material e do ângulo de inclinação. Os fluxos de detritos são normalmente desencadeados por um intenso fluxo de água na superfície, devido a chuvas elevadas ou degelo rápido, que causam erosão e movimentam rochas e solo, podendo também resultar a partir de outros tipos de deslizamentos. Devido a ocorrerem de forma rápida e imediata, os fluxos de detritos podem ser letais, podendo mover objetos, como veículos e habitações, e enterrar estruturas (Highland & Bobrowsky, 2008).

---

Em áreas vulcânicas, podem ocorrer fluxos de detritos vulcânicos que podem atingir áreas extensas. Este tipo de escoamento origina-se em taludes de vulcões e é um tipo de fluxo de detritos, sendo a água o mecanismo primário de desencadeamento. Contudo, os maiores deslizamentos deste tipo e os mais letais ocorrem associados a erupções vulcânicas. Outro tipo de escoamento são as avalanches de detritos; caracterizam-se por escoamentos grandes, extremamente rápidos e são formadas quando uma encosta instável se rompe e os fragmentos resultantes são transportados a longas distâncias. As avalanches podem transportar blocos de grande diâmetro, por vários quilômetros. Este tipo de fenômeno pode ocorrer de forma rápida a extremamente rápida (Highland & Bobrowsky, 2008).

A Figura 9 apresenta um esquema de um deslizamento do tipo avalanches de detritos.

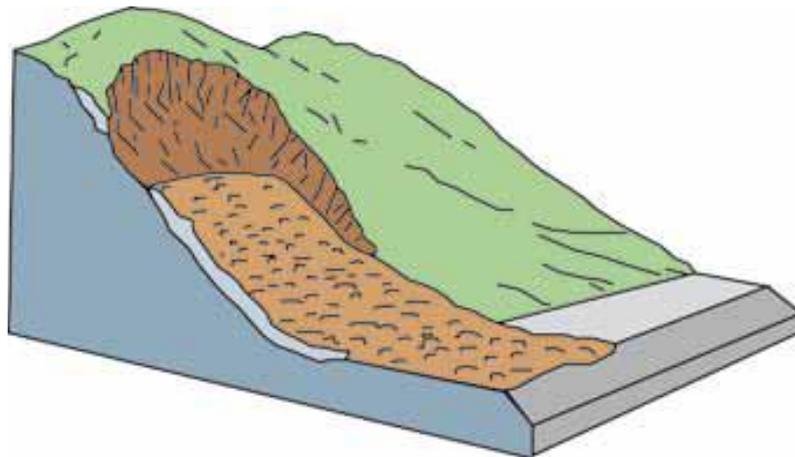


Figura 9. Esquema do tipo de deslizamento avalanche de detritos (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)

Os principais mecanismos de desencadeamento são a ação do tempo em terrenos íngremes, ou atividades vulcânicas e sismos. As avalanches de detritos podem causar grandes perdas econômicas e humanas, uma vez que se deslocam rapidamente e, por isso, existe pouca hipótese de alerta e de reação (Highland & Bobrowsky, 2008).

Os fluxos de solo podem ocorrer em inclinações suaves e moderadas, geralmente em solo que apresenta granulação fina. A massa em fluxo de terra move-se como um fluido plástico e viscoso, com intensa deformação interna. O tamanho deste tipo de deslizamento vai aumentando conforme se desloca pelo talude. Escorregamentos e espalhamentos laterais podem evoluir para um fluxo de solo (Highland & Bobrowsky, 2008).

---

A Figura 10 apresenta um esquema de um deslizamento do tipo fluxo de solo.

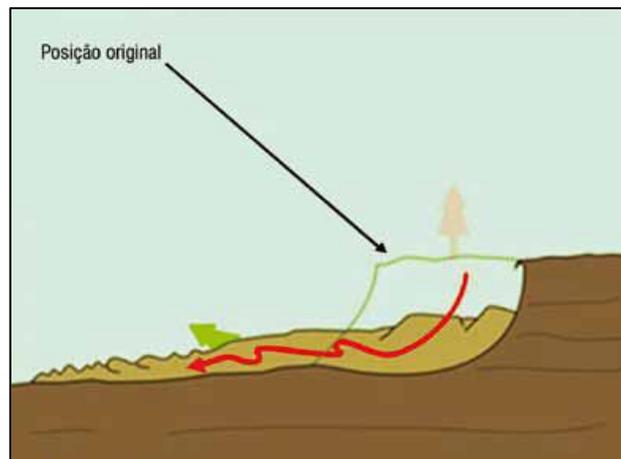


Figura 10. Esquema do tipo de deslizamento fluxo de solo (retirado de Highland & Bobrowsky, 2008)

A velocidade deste tipo de fenómeno pode variar de lenta a muito rápida, sendo o principal mecanismo que o desencadeia a saturação do solo devido a chuvas intensas; contudo, também pode ser desencadeado por erosão na base do talude, escavações, construções e sismos ou vibrações induzidas por atividades humanas. Como principais consequências que pode apresentar este tipo de deslizamentos identifica-se a danificação de infraestruturas, como habitações e vias de comunicação, podendo mesmo devastar grandes áreas planas (Highland & Bobrowsky, 2008).

Existem ainda fluxos lentos de solo (*"Creep"*) que consistem em um movimento lento, impercetível e contínuo. Este tipo de deslocamento é causado por tensões de corte internas suficientes para causarem deformações, mas insuficientes para causarem rotura. Existem três tipos diferentes de fluxos lentos de solo: os sazonais, onde o movimento ocorre devido as alterações sazonais; os contínuos, no qual as tensões de corte continuamente excedem a resistência do material; e os progressivos, nos quais o talude atinge o ponto de rotura, gerando outros tipos de deslizamentos. Este tipo de fenómeno é, provavelmente, o tipo mais comum de deslizamento, uma vez que frequentemente precede outros tipos de deslizamentos (Highland & Bobrowsky, 2008). Uma vez que este tipo de deslizamento é lento, geralmente, representa pequenas perdas económicas, causando poucos estragos podendo, contudo, desencadear outro tipo de deslizamento mais gravesos.

---

A Figura 11 apresenta um esquema de um deslizamento do tipo fluxo lento de solo.

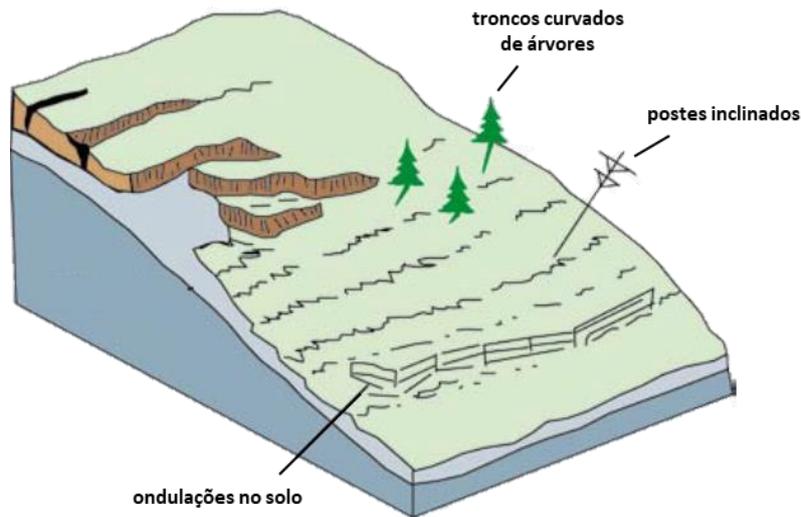


Figura 11. Esquema do tipo de deslizamento fluxo lento de solo (adaptado de Highland & Bobrowsky, 2008)

Outro tipo de escoamentos são que ocorrem em subsolos permanentemente gelados; este tipo de movimento envolve movimentos de solo de granulação fina e o congelamento, em alguma fase, do solo, podendo ocorrer em inclinações suaves. O degelo sazonal que ocorre pode enfraquecer a camada de superfície de um talude e iniciar o escoamento, podendo este evoluir para um fluxo de detritos maior. A velocidade deste tipo de escoamento pode variar entre muito lenta e rápida, e ocorre com maior frequência em áreas que se encontrem permanentemente congeladas. Podem ser desencadeados por aumento da temperatura, incêndios e distúrbios antropogénicos, podendo causar danos em infraestruturas e tubulações (Highland & Bobrowsky, 2008).

#### 2.2.6. Rotura em Maciços Rochosos

Em taludes constituídos por maciços rochosos existe um conjunto de deslizamentos específicos. Nestes taludes, os tipos de rotura dependem de diversos fatores, sendo os principais o grau de fracturação do maciço rochoso, a orientação e a distribuição das discontinuidades ao longo do talude rochoso. A estabilidade destes taludes é definida pela resistência das discontinuidades e da rocha intacta (Wyllie & Mah, 2004; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Wyllie, 2014).

Os tipos de rotura mais frequentes em maciços rochosos são a rotura planar, a rotura em cunha e o deslizamento por tombamento, este último e a rotura planar já mencionados anteriormente. Sendo as características destes muito similares entre si (González de Vallejo & Ferrer, 2011).

A rotura planar ocorre segundo uma superfície preexistente, devido à presença de uma descontinuidade que apresenta uma inclinação igual ou inferior à da superfície do talude. Sendo que a descontinuidade pode corresponder a diáclases, falhas ou à estratificação do maciço rochoso (Wyllie & Mah, 2004; Wyllie, 2014). A Figura 12 apresenta um esquema de uma rotura planar.

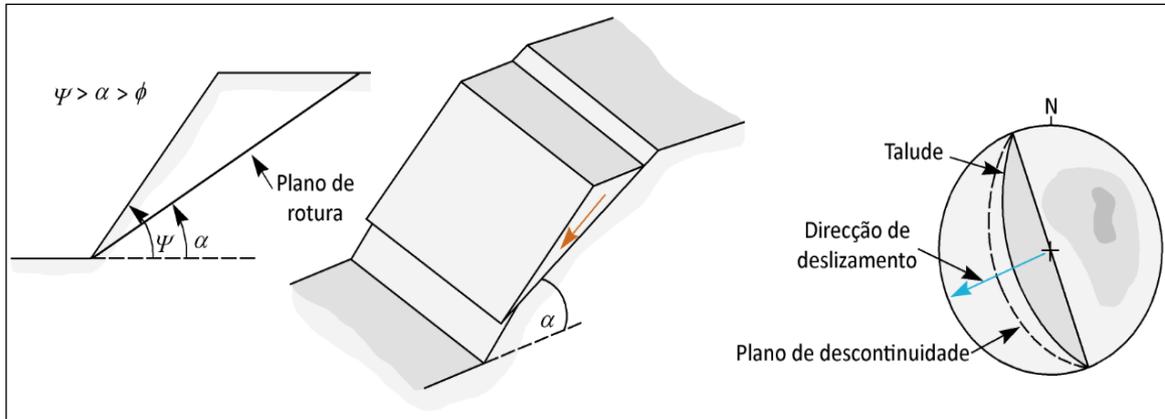


Figura 12. Esquema de uma rotura planar (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011)

Para que este tipo de rotura ocorra é necessário que a inclinação da descontinuidade ( $\alpha$ ) seja igual ou inferior à da superfície do talude ( $\psi$ ) e superior ao seu ângulo de atrito interno ( $\phi$ ).

No caso de taludes estratificados, a rotura planar consiste no deslizamento dos estratos, sendo este tipo de rotura frequente em maciços rochosos xistentos, onde os planos de rotura ocorrem devido ao efeito de foliação característico destes materiais. Existem diversos tipos de rotura planar que dependem da distribuição e das características das famílias de descontinuidades presentes no talude (Wyllie & Mah, 2004; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Wyllie, 2014).

A rotura em cunha corresponde ao deslizamento de um bloco com formato de cunha, formado pelos planos de descontinuidade, a favor de uma linha de interseção. A Figura 13 apresenta um esquema de uma rotura em cunha.

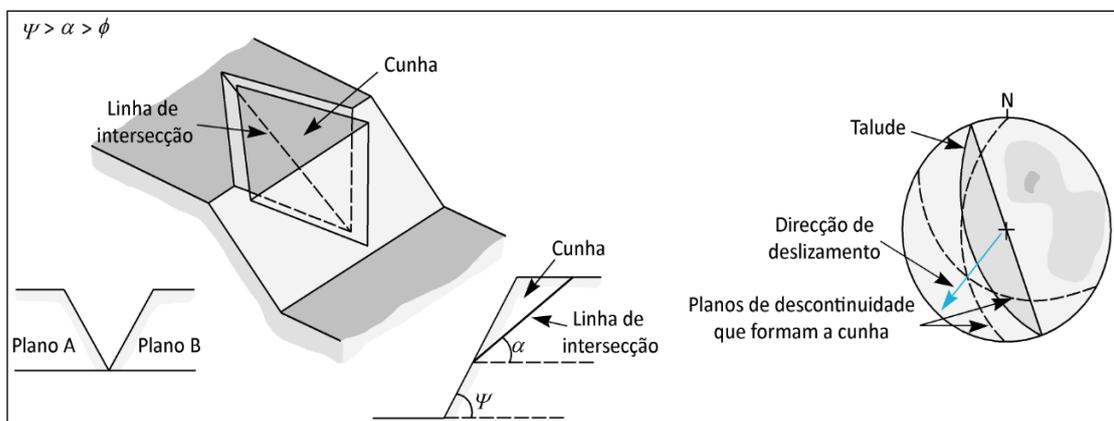


Figura 13. Esquema de uma rotura em cunha (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011)

---

Para que este tipo de deslizamento ocorra, os planos das discontinuidades devem aflorar à superfície e satisfazer as mesmas condições mencionadas anteriormente para a rotura planar. Este tipo de rotura ocorre geralmente em maciços rochosos com várias famílias de discontinuidades, cujas características das mesmas (espaçamento, orientação e continuidade) determinam a forma e o volume da cunha de deslizamento. A rotura por tombamento ocorre em taludes rochosos onde as discontinuidades presentes no maciço apresentam inclinações contrárias ao do talude e uma direção paralela ou sub-paralela (Wyllie & Mah, 2004; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Wyllie, 2014).

A Figura 14 apresenta um esquema ilustrativo da rotura por tombamento.

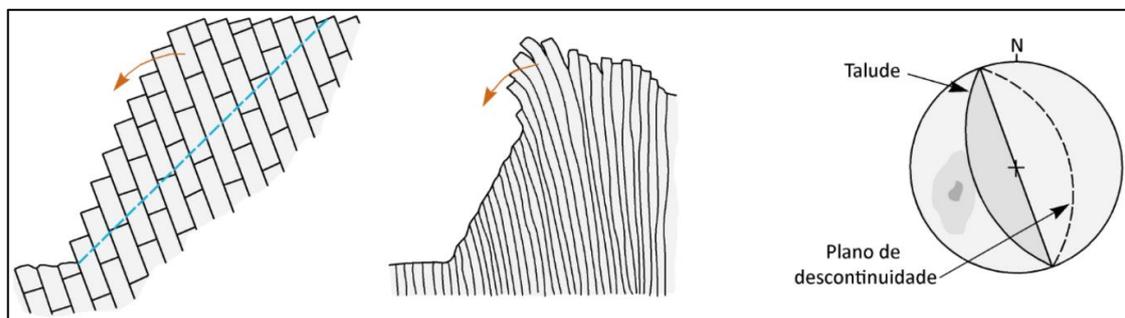


Figura 14. Esquema de uma rotura por tombamento (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011)

Para que aconteça este tipo de fenómeno de rotura, é necessário que ocorra um movimento de rotação dos blocos, não estando a sua estabilidade exclusivamente condicionada pela resistência ao deslizamento. Na maioria das situações o maciço rochoso do talude apresenta-se sob a forma de blocos individuais, resultantes da ação de um sistema de discontinuidades ortogonais entre si. Outro tipo de rotura que pode ocorrer em maciços rochosos é a rotura por encurvadura. Este tipo de rotura acontece quando os planos de descontinuidade são paralelos à inclinação do talude e apresentam um declive maior que o ângulo de atrito. Este tipo de rotura pode acontecer com ou sem flexão do estrato, dependendo da possança do mesmo em relação à altura do talude (Wyllie & Mah, 2004; González de Vallejo & Ferrer, 2011; Wyllie, 2014).

A Figura 15 apresenta um esquema de uma rotura por encurvadura.

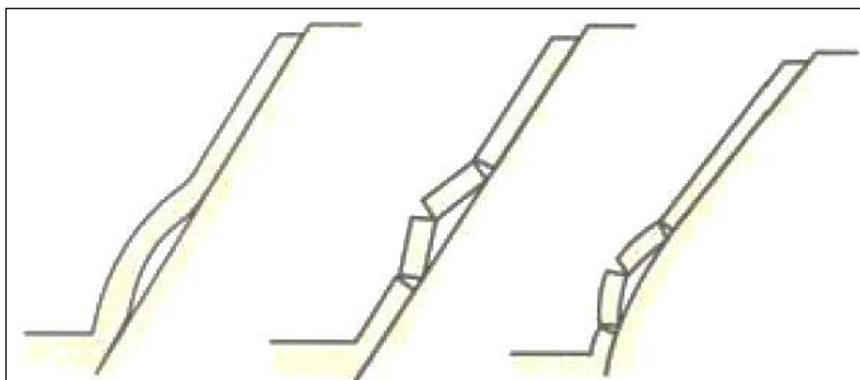


Figura 15. Esquema de uma rotura por encurvadura (adaptado de González de Vallejo & Ferrer, 2011).

As principais causas deste tipo de deslizamento são a altura excessiva do talude, a existência de fissuras externas nos estratos, a geometria desfavorável dos estratos, a existência de pressões de água sobre os estratos e a concentração desfavorável de tensões.

#### 2.2.7. Síntese dos principais tipos de deslizamento

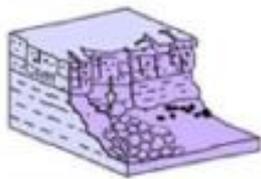
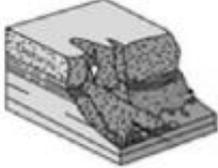
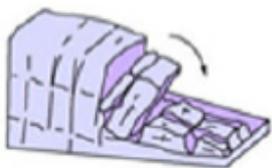
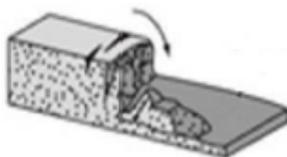
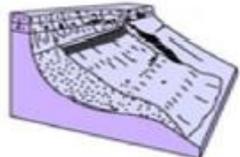
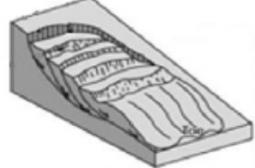
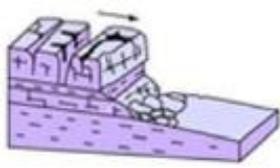
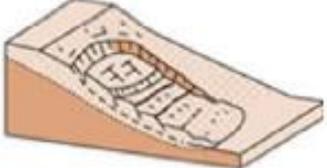
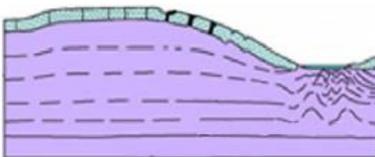
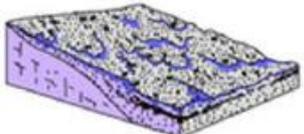
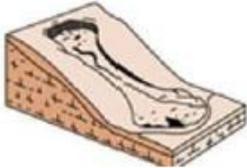
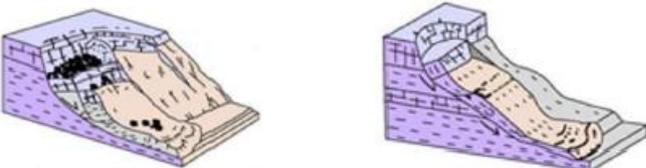
Em síntese, no Quadro 2 são identificados todos principais tipos de deslizamento classificados pela velocidade de deslocamento característica, podendo esta variar entre extremamente rápida e muito lenta (Varnes, 1978).

Quadro 2. Escala de velocidade para os principais tipos de deslizamentos (Varnes, 1978).

Classificação	Velocidade	Tipo de Deslizamento
Extremamente rápido	3 m/s	Tombamento e Escoamentos
Muito rápido	0,3 m/min	
Rápido	1,5 m/dia	Escorregamento e Espalhamento Lateral
Moderado	1,5 m/mês	
Lento	1,5 m/ano	
Extremamente lento	0,3 m/5anos	Escoamentos lentos

No Quadro 3 apresenta-se uma síntese dos principais tipos de deslizamentos tendo em conta os diferentes tipos de materiais.

Quadro 3. Síntese dos principais tipos de deslizamento (adaptado de Varnes, 1978).

Tipo de movimento	Material		
	Rocha	Detritos	Solos
Queda			
Tombamento			
Escorregamento Rotacional			
Escorregamento Translacional			
Espalhamento Lateral			
Escoamentos			
Movimentos Complexos			

---

### 2.3. *Soluções de Estabilização*

Neste subtópico serão apresentadas possíveis soluções a adotar, quando se observa a instabilização de um talude. A aplicação correta destas medidas tem como objetivo tornar o talude estável e/ou mitigar os efeitos do meio ambiente ou de ações antrópicas sobre o mesmo. A estabilização de um talude compreende um conjunto de intervenções de natureza construtiva com o objetivo de aumentar a sua segurança e de evitar que o mesmo atinga uma situação de instabilização que possa afetar infraestruturas e pessoas. Há uma quantidade significativa de bibliografia sobre esta temática, destacando-se, entre outra, a consultada e sintetizada nas linhas seguintes: UDCO (2006), Mattos (2009), Coelho (2010), Tinoco et al. (2014), Pinheiro et al. (2014, 2015), Silva (2012, 2015), Fernandes (2017), Barreto et al. (2018), entre outras.

As soluções de estabilização de taludes são ações efetivas que contribuem para a minimização da instabilidade dos taludes e que devem ser adotadas tendo em conta as condições existentes no local. A estabilidade de um talude pode ser conseguida de duas formas diferentes, diminuindo as forças instabilizadoras que atuam sobre o talude ou aumentando as forças estabilizadoras. As soluções de estabilização podem ser classificadas tendo em conta a sua natureza (Santos, 2017):

- Soluções de Natureza Geométrica;
- Soluções de Natureza Hidráulica;
- Soluções de Natureza Estrutural;

Em alguns casos a solução proposta pode complementar um conjunto de soluções de diferentes naturezas.

As soluções de natureza geométrica implicam a alteração das características geométricas do talude, podem realizar-se por remoção de material de zonas ativas, por redução do ângulo de inclinação e/ou da altura do talude, através da construção de banquetas e da colocação de material na base do talude. Estas encontram-se muitas vezes fora de questão quando o talude apresenta no seu topo construções e infraestruturas relevantes, como habitações ou vias de comunicação.

As soluções de natureza hidráulica encontram-se relacionadas com o sistema de drenagem presente no talude e com a sua eficácia na remoção da água superficial e profunda. É fundamental, nestas soluções, definir uma periodicidade para realizar os trabalhos de manutenção dos elementos de drenagem, evitando assim que a eficácia do sistema de drenagem diminua.

As soluções de natureza estrutural têm como objetivo principal incrementar a resistência média ao corte do solo, através da aplicação de um elemento resistente no terreno ou através da construção de uma estrutura de contenção.

---

As soluções de estabilização podem ainda ser agrupadas em quatro tipos diferentes:

- Soluções de Proteção;
- Soluções de Correção;
- Soluções de Reforço e Contenção;
- Soluções de Alarme;

As soluções de proteção englobam os sistemas que têm como fim evitar que as massas de terreno se desloquem perigosamente, uma vez instabilizadas.

As soluções de correção e de reforço têm como objetivo aumentar as forças resistentes ou diminuir as forças que promovem a instabilização do talude.

Geralmente, as soluções de proteção apresentam custos iniciais menores que os de correção e reforço. Porém, a sua utilização prolongada encarece a utilização dos mesmos, principalmente em taludes de grande importância que requerem uma manutenção contínua (Mendonça, 1997).

As soluções de alarme têm como fim alertar com antecedência para possíveis ocorrências de deslizamentos, não tendo uma ação direta sobre o mecanismo de rotura.

A decisão de escolha entre as diferentes soluções disponíveis deve basear-se nos respectivos custos de instalação e de manutenção em exploração, sendo estes custos tanto maiores quanto maiores forem as consequências de um possível deslizamento. Outros fatores operacionais, como o tempo de instalação e a facilidade de acesso, podem contribuir para a escolha da solução de estabilização mais adequada para uma determinada situação.

### *2.3.1. Soluções de Proteção*

Entre os principais métodos de proteção encontra-se a colocação de telas e geotêxtil sobre a face dos taludes e a execução e aplicação de:

- Valas de Retenção;
- Banquetas destinadas a diminuir alturas de queda;
- Redes de encaminhamento;
- Barreiras rígidas ou estáticas;
- Barreiras flexíveis ou dinâmicas;
- Galerias de proteção ou “falso” túnel;

Estas soluções de proteção têm como principal objetivo controlar a queda de blocos rochosos de pequena e grande dimensão, criar obstáculos ao seu movimento de queda, evitando assim que atinjam elementos de maior importância, como vias rodoviárias e linhas ferroviárias. Através da colocação de telas e geotêxtil sobre a face do talude pretende-se diminuir as ações do meio ambiente sobre o talude. Outra solução pode ser o saneamento de blocos instáveis de forma controlada e segura. A Figura 16 apresenta um conjunto de algumas das soluções de proteção mencionadas.

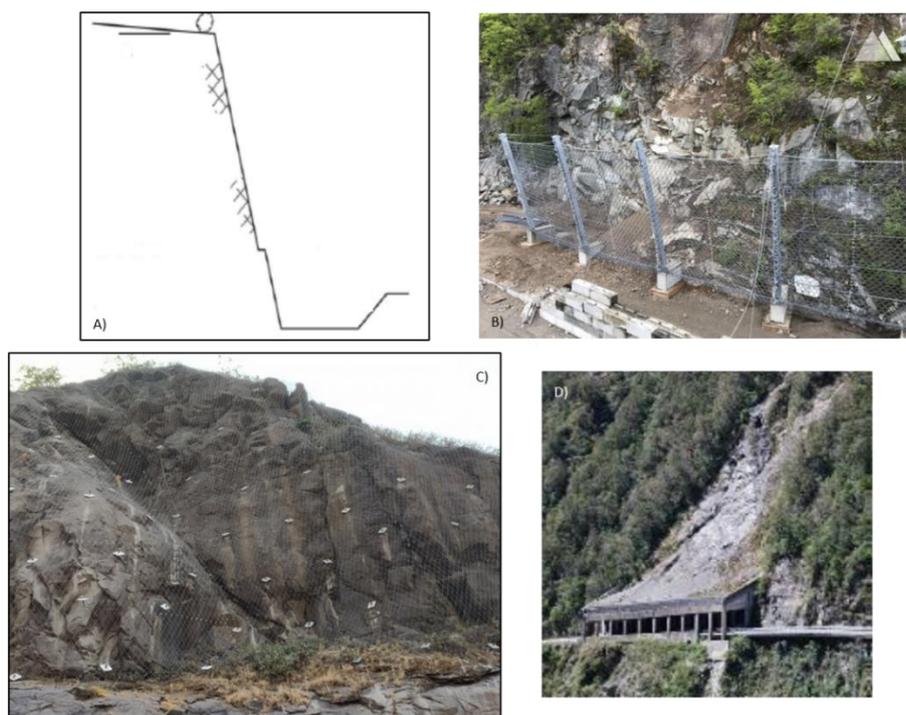


Figura 16. Soluções de Proteção: A) – Esquema de uma vala de retenção; B) - Barreiras flexíveis; C) - Redes de Proteção; D) – Galeria de proteção (adaptado de Geobruigg, 2020)

### 2.3.2. Soluções de Correção

Existem diversas soluções de correção com o objetivo de aumentar o coeficiente de segurança de um talude numa situação de instabilidade; a solução adotada deverá ser determinada mediante um compromisso entre a segurança e a economia. As soluções de correção podem ser divididas em geométricas e hidráulicas.

As soluções geométricas envolvem a alteração das condições geométricas do talude, de modo a obter-se uma maior estabilidade, através do reperfilamento, sendo as mais comuns a diminuição da altura do talude ou a redução da inclinação do mesmo. Estas consistem, geralmente, na primeira solução a ser considerada, uma vez que é um procedimento não muito dispendioso, simples e de grande eficácia. Outra solução do tipo geométrica, é a remoção de material do topo do talude ou a

colocação de material junto à sua base do talude; num talude instável a aplicação de uma solução deste tipo deve-se iniciar sempre pelas maiores cotas. A Figura 17 apresenta um esquema de um reperfilamento de um talude.

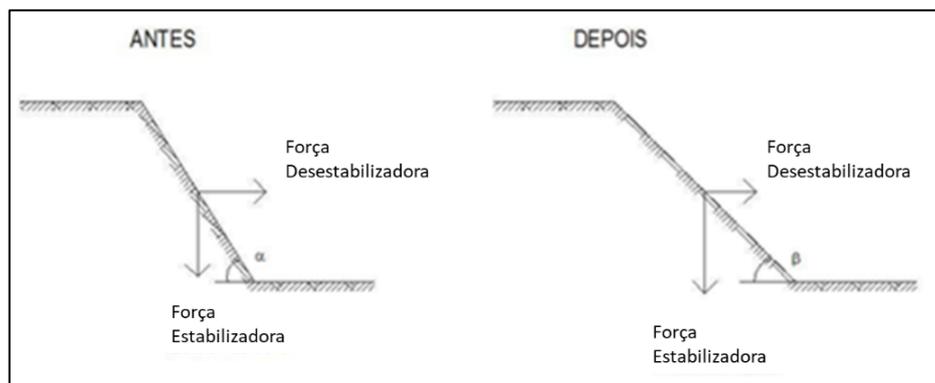


Figura 17. Esquema de reperfilamento de um talude (adaptado de Oliveira, 2010)

A reconstrução completa do talude pode ser outra solução a considerar em talude de aterro, sendo que a reconstrução deve ter em conta os cuidados básicos necessários para garantir a eficácia e a estabilidade do talude. Esta solução pode ser considerada quando não existem outras que garantam a resolução completa do problema, uma vez que é uma solução que acarreta elevados custos económicos e de grande complexidade. É fundamental para a construção de um talude ou para a sua reconstrução definir o solo e o tratamento adequado, realizar a correta preparação do terreno de fundação, desenvolver um sistema de drenagem eficaz e controlar a compactação do aterro (Carrasco, 2015).

As soluções hidráulicas são uma das medidas mais eficazes no controlo dos deslizamentos, e consistem na realização de sistemas de drenagem, uma vez que, como já referido, a água é um dos principais fatores responsáveis pela instabilização de taludes. Em alguns casos, a adoção deste tipo de solução pode evitar a escolha de outras que possa causar maiores impactos paisagísticos.

Os sistemas de drenagem podem ser classificados como drenagem superficial e drenagem profunda; estes sistemas têm como objetivos principais promover a rápida escorrência das águas superficiais, reduzir as ações da água sobre os taludes, evitar o acesso da água à fundação do aterro no caso de taludes artificiais, restabelecer as linhas de água que foram afetadas pela construção e reduzir os efeitos das pressões hidrostáticas sobre obras de contenção.

A drenagem superficial tem como finalidade assegurar a recolha e o escoamento das águas pluviais que incidem diretamente sobre a plataforma e sobre os taludes, minimizando assim a infiltração da água. Para o melhor funcionamento deste sistema é fundamental assegurar a proteção dos taludes com vegetação.

---

O sistema de drenagem superficial de um talude pode ser constituído por valetas de banqueteta, valetas de bordadura de aterro, valetas de crista de talude, valetas de descida de talude, valetas de pé de talude e valetas de plataforma. Estes dispositivos têm como objetivo evitar a acumulação de água, de modo a não contribuir para a alteração do estado hídrico da fundação e consequente diminuição da capacidade de suporte.

Em taludes de aterro existem ainda passagens hidráulicas que têm como objetivos assegurar o escoamento dos cursos de água natural que atravessam a infraestrutura.

A drenagem profunda tem como principal objetivo a remoção da água de percolação interna dos terrenos e baixar o nível freático. O sistema de drenagem profunda inclui:

- Túneis;
- Galerias drenantes
- Drenos sub-horizontais;
- Trincheiras drenantes;
- Poços de alívio;
- Máscaras drenantes;
- Esporões drenantes;
- Furos drenantes;

É fundamental para o funcionamento adequado do sistema de drenagem que exista uma correta compatibilização entre os dois tipos de drenagem e a sua manutenção, para evitar que este sistema possa ser uma causa de problemas e de instabilização para os taludes e estruturas de contenção.

Deverá ter-se presente que através dos movimentos do talude e dos muros de contenção estes elementos podem sofrer rotura, por esse motivo é fundamental verificar periodicamente o estado em que se encontram estes elementos.

### *2.3.3. Soluções de Reforço e Contenção*

As soluções de reforço e contenção têm como princípio incrementar a resistência média ao corte do solo através da aplicação de um elemento resistente no terreno ou através da construção de uma estrutura de contenção. Geralmente, as soluções de reforço são operações que acarretam elevados custos.

---

As soluções de reforço englobam:

- a aplicação de pregagens, ancoragens ou microestacas;
- a injeção de caldas, ou a aplicação de “Jet Grouting”;
- a aplicação de betão projetado na superfície do talude;
- a construção de estruturas de contenção:
  - Muros de Gravidade em betão simples;
  - Muros de Gabiões;
  - Muros de Betão Armado em “T”, em “L” ou de Contrafortes;
  - Muros de Betão Armado Ancorados e Pregados;
  - Paredes Moldadas Ancoradas;
  - Paredes do tipo Berlim Ancoradas ou Pregadas;
  - Cortinas de Estacas Ancoradas ou Pregadas;
  - Muros de Terra Armada.

A Figura 18 apresenta um conjunto de algumas das soluções de reforço e contenção mencionadas.



Figura 18. Soluções de Reforço e Contenção: A) – Betão Projetado; B) – Muro de Gabiões; C) – Muro de Betão Armado com Ancoragens; D) – Muro de Terra Armada

É fundamental dimensionar corretamente as soluções de reforço e contenção aplicadas a um determinado talude, tendo em conta as características de cada situação, uma vez que estas

---

estruturas ficam também sujeitas a um conjunto de ações que podem causar a sua instabilização e consequente rotura.

A rotura de uma estrutura de contenção e reforço pode ocorrer de diversas formas, por exemplo por perda de estabilidade global, por rotura do terreno de fundação, por derrubamento, por falta de capacidade a ações verticais, por rotura estrutural do paramento ou dos elementos de suporte (por exemplo, arrancamento de ancoragens).

Este tipo de solução necessita de ser acompanhada por um rigoroso faseamento construtivo e, posteriormente, por um plano de manutenção, auscultação e observação ao longo da sua exploração.

#### *2.3.4. Soluções de Alarme*

Em áreas propensas à ocorrência de deslizamentos, a adoção de soluções que possibilitem a mitigação de riscos, frequentemente apresentam problemas relacionados com recursos económicos, impactos ambientais e questões de logística. Estes problemas são particularmente importantes nas soluções de reforço e contenção, nas soluções de correção e nas soluções de proteção, que têm o objetivo de mitigar o risco, reduzindo a probabilidade de rotura ou impedindo que o deslizamento atinja elementos de maior importância.

Por outro lado, as soluções de alarme, através da implementação de um sistema de alerta antecipado, são uma alternativa económica de reduzir o risco com um impacto reduzido. Em alguns casos podem ser a única solução viável, por exemplo, em deslizamentos de grande dimensão que não podem ser estabilizados (Intrieri et al., 2012).

Os sistemas de alerta atuam sempre como uma ferramenta de mitigação de risco, atuando sobre a exposição dos elementos em risco, especialmente pessoas, mantendo-as afastadas de áreas perigosas em casos de deslizamento iminente.

Através de fios elétricos ou vedações ligadas a sistemas de buzinas, sirenes ou lâmpadas, podem ser evitados acidentes, especialmente os que envolvem pessoas. Geralmente, este tipo de método encontra-se associado aos de proteção. Num sentido lato, a instrumentação colocada nos taludes também constitui um sistema de alarme antecipado, visto que permite monitorizar o seu comportamento, especialmente a partir das medidas de deslocamentos interiores e exteriores do talude (Mendonça, 1997).

Os sistemas de alerta não são apenas constituídos por um conjunto de métodos e equipamentos de monitorização ou de previsão de ocorrência de rotura, mas também devem complementar

outros aspetos, como a identificação de cenários de riscos, planos de emergência, considerações sociais, entre outros.

As soluções de alerta devem incluir (Intrieri et al., 2012):

- Monitorização da estrutura, incluindo aquisição de dados, transmissão e manutenção dos equipamentos;
- Análise dos dados e previsão de um possível deslizamento;
- Aviso, alerta para a ameaça iminente;
- Resposta, por parte da população.

Estes sistemas devem ser projetados tendo em conta as características de cada local e as características do tipo de deslizamento que poderá ocorrer.

### 2.3.5. Síntese das principais soluções de estabilização de taludes

O Quadro 4 apresenta uma síntese das principais soluções de estabilização de taludes.

Quadro 4. Síntese das principais soluções de estabilização de taludes (retirado de Matos Fernandes, 2011)

Tipo de soluções	Descrição	Vantagens	Observações
<b>Alteração da geometria do talude</b>	Remoção de massa da zona ativa e (ou) redução da inclinação.	Redução do peso na zona ativa e redução das forças instabilizadoras.	Pode ser inviável em zonas com infraestruturas, deve ser sempre executado de cima para baixo. Tem de ser acompanhado por drenagem superficial.
	Colocação de aterro na base do talude.	Aumento do peso da zona passiva.	Pode ser inviável em zonas com infraestruturas, pode constituir uma medida de emergência.
<b>Soluções de Natureza hidráulica</b>	Drenagem Superficial	Diminuição da infiltração de águas pluviais e redução das pressões e do peso do maciço.	É fundamental complementar esta solução com a proteção da face do talude.
	Drenagem Profunda	Redução das pressões, do peso do maciço e controlo do nível freático.	Pode ser executada por gravidade ou por bombagem.
	Preenchimento de fendas e Proteção da face do talude.	Diminuição da infiltração de águas e proteção do talude sobre a erosão.	A utilização de materiais sintéticos impermeáveis pode causar algum impacto paisagístico.
<b>Soluções de Natureza Estrutural</b>	Aplicação de forças exteriores	A componente normal aumenta a força resistente na superfície de deslizamento.	É fundamental realizar o correto dimensionamento destas soluções para garantir a segurança de toda a estrutura.
	Reforço do terreno na zona da superfície de deslizamento.	Aumenta a resistência ao corte na superfície de deslizamento.	

---

## **Capítulo III**

### **Monitorização e Instrumentação de Estruturas Geotécnicas**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

### **3. Monitorização e Instrumentação de Estruturas Geotécnicas**

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os principais métodos de monitorização e de instrumentação que se encontram disponíveis para a observação e auscultação de estruturas geotécnicas, referindo em que situações podem ser implementados e as respetivas vantagens na sua utilização.

A observação e a auscultação de obras geotécnicas englobam um conjunto de métodos, instrumentos e dispositivos que se destinam a medir grandezas que contribuem para o conhecimento do comportamento da estrutura ou dos seus elementos, a avaliação da sua segurança e da sua funcionalidade durante a fase de exploração da estrutura (Gusmão Filho, 2006).

A observação de obras geotécnicas tem como objetivo principal monitorizar o comportamento da estrutura, da sua envolvente e as características do terreno, de modo a prever o seu comportamento quando estas se encontram sujeitas a cargas, movimentos e outras ações que podem ter diversas origens. A eficiência e a eficácia de um plano de observação e auscultação dependem fundamentalmente do seu planeamento, dos dispositivos utilizados, da recolha de informação, da análise e interpretação dos dados adquiridos e, por fim, da definição das soluções a adotar em função das conclusões obtidas (Raposo, 2011).

Em qualquer obra geotécnica não é possível prever, de uma forma precisa, o seu comportamento. Por esse motivo, atualmente, a criação de um plano de observação e auscultação para estruturas geotécnicas é inquestionável, permitindo assim a deteção, em tempo útil, de possíveis falhas e a implementação de soluções de estabilização (Ferreira et al., 2020).

Uma das atividades de observação mais utilizadas durante a fase de exploração, são as inspeções visuais. A inspeção visual consiste em realizar inspeções periódicas a uma determinada estrutura, desta forma, sendo possível, identificar sinais evidentes de perigo ou alterações que tenham ocorrido entre diferentes inspeções, que possam afetar a segurança e a funcionalidade da estrutura ou de um determinado elemento da estrutura, por exemplo a drenagem. Contudo, nas inspeções visuais não é possível detetar pequenos movimentos ou deformações graduais contínuas. Nessas situações, ou em estruturas de maior importância, será então necessário implementar instrumentos ou metodologias que possibilitem monitorizar as mesmas.

A partir dos dados obtidos na observação e auscultação é possível validar os parâmetros do projeto, analisar o comportamento da estrutura durante a sua vida útil e identificar comportamentos que possam levar à instabilização da estrutura.

---

### 3.1. Monitorização

A monitorização é uma ação que utiliza e se apoia na instrumentação e na observação para o controlo de uma estrutura nas suas diversas fases de vida, tendo por base um conjunto de critérios de deformação e variação exetáveis. A monitorização baseia-se na observação, controlo e medição de grandezas correlacionáveis e em pressupostos de comportamento que permitem um reconhecimento de fenómenos de instabilização e apoiam a tomada de decisão (Rocha, 2014). Há uma quantidade fundamental de bibliografia sobre o tema, destacando-se, entre outra: Dunicliff (1982), Kane & Beck (2000), Reeves et al. (2005), Marques (2007), Haberler-Weber et al. (2009), Raposo (2011), de Graaf et al. (2013), Tinoco et al. (2014), Rocha (2014), Sousa (2014), Siebenmann et al. (2015), Dixon et al. (2015), Li et al. (2016), ICES et al. (2017) e Haryanto (2019).

A implementação de um plano instrumentação e observação em todas as fases de uma estrutura geotécnica, fase de projeto, construção e exploração, apresenta grandes benefícios em termos de garantia da funcionalidade, durabilidade e segurança da estrutura.

A monitorização durante a fase de projeto tem como principal vantagem possibilitar que as fases seguintes ocorram de melhor forma e com um melhor conhecimento das condicionantes presentes no local. Os benefícios da implementação de um plano de instrumentação e observação durante a fase de projeto são (Santos, 2017):

- Obtenção de parâmetros como a pressão intersticial e suas variações, utilizando piezómetros, durante os trabalhos de prospeção;
- Verificação das condições hidrogeológicas, posição do nível freático e a permeabilidade;
- Determinação de estados de tensão e de deformabilidade *in-situ*;

Durante a fase de obra, o plano de instrumentação e observação vai depender essencialmente do tipo e do tamanho da obra, das condicionantes presentes no local e do planeamento da obra. Na fase de obra, a implementação de monitorização pode ser utilizada como um auxiliar na construção e apresenta os seguintes benefícios (Rocha, 2014):

- Execução de ensaios em aterros experimentais ou ensaios de carga estáticos e dinâmicos em estacas, para verificação de taxas de assentamento ou para verificação de comportamentos da estrutura;
- Confirmação de todos os parâmetros geotécnicos;
- Controlo do comportamento da estrutura em execução, do maciço envolvente e das estruturas presentes na envolvente da obra;

- 
- Definição da velocidade de avanço e controlo da qualidade de execução da obra;
  - Segurança da obra;

Durante a fase de exploração de uma estrutura geotécnica a monitorização apresenta os seguintes benefícios (Rocha, 2014):

- Controlo da estrutura durante o seu período de vida;
- Controlo do comportamento do maciço envolvente e a interação deste com a estrutura;
- Verificação das condições de operação e segurança;

Em termos gerais, a utilização e implementação de um plano de instrumentação e observação apresenta sempre vantagens, quando bem aplicado, e permite obter os seguintes benefícios (Santos, 2017):

- Antecipação de qualquer tipo de ocorrência em estruturas geotécnicas;
- Avaliação dos pressupostos de projeto com o intuito de diminuir os riscos;
- Minimizar os efeitos sobre estruturas que se encontram na envolvente da estrutura;
- Avaliação e melhoria do método construtivo adotado e dos meios para execução da obra;
- Fornecimento de garantias de qualidade, especialmente no caso de projetos de construção;
- Controlo durante a fase de construção;
- Facilidade na conceção de ações de correção em situações de alarme;
- Auxílio na gestão de projetos;
- Promoção de correções em projetos futuros;

Das grandezas que podem ser observadas e posteriormente controladas para garantir a qualidade e segurança da estrutura destacam-se:

- Medição dos deslocamentos superficiais (horizontais e verticais);
- Medição dos deslocamentos internos (horizontais e verticais);
- Medição de tensões;
- Medição do nível hidrostático;

---

### 3.2. Instrumentação

A instrumentação engloba o conjunto de técnicas e equipamentos que são utilizados em estruturas geotécnicas, com o objetivo de obter dados sobre o comportamento das mesmas.

Atualmente, os dispositivos de instrumentação englobam desde simples equipamentos de medição mecânica, onde os dados são registados manualmente, até sistemas eletrónicos complexos, onde os dados são registados através de um “datalogger” que permite aceder e descarregar os dados de forma remota. Os instrumentos implementados em obras geotécnicas podem ser subdivididos em três classes fundamentais, em função do fim a que se destinam (Torres, 2010):

- Medição de deformações verticais e horizontais;
- Medição das cargas e das deformações do suporte;
- Medição dos níveis freáticos e das tensões neutras;

Atualmente, existem diversos instrumentos que se encontram disponíveis no mercado para monitorizar estruturas geotécnicas. Os principais objetivos da aplicação de instrumentação são (Mendonça, 1997):

- Determinação da profundidade e forma geométrica da superfície de rotura que esteja a afetar a estabilidade da estrutura;
- Medição dos deslocamentos absolutos, nas três direções (x, y e z);
- Avaliação das velocidades e acelerações de um deslocamento para a previsão dos perigos ou para constatação dos efeitos estabilizadores de trabalhos de manutenção ou da implementação de soluções de estabilização;
- Determinação da posição da água subterrânea e das pressões neutras a fim de ser possível efetuar análise da estabilidade;
- Acompanhamento do comportamento dos taludes em função do avanço dos trabalhos de construção ou de efeitos externos, que alterem as condições de fronteira;
- Medição de grandezas e parâmetros que possam refletir movimentos e processos de instabilização.

---

Cada projeto apresenta um conjunto de parâmetros críticos e condicionantes que devem influenciar a escolha do método e/ou do equipamento que serão implementados para a monitorização da estrutura. Os fatores que devem ser tidos em conta durante a escolha do tipo de instrumentação a implementar são:

- Condições do solo;
- Desempenho do instrumento;
- Custos associados à aquisição, à instalação, à leitura e à manutenção do equipamento;
- Condições ambientais;
- Armazenamento de dados;
- Vida útil do equipamento.

Os instrumentos de medição de determinadas grandezas devem ser instalados em conformidade com o local onde serão colocados, para que a presença e a instalação do equipamento não afete os valores do parâmetro a observar.

Dependendo do tipo de obra e da informação que se pretende adquirir, as características do instrumento de monitorização devem ser definidas criteriosamente relativamente aos seguintes parâmetros:

- Sensibilidade;
- Robustez;
- Alcance;
- Resolução e exatidão;
- Precisão e repetibilidade;
- Campo de leitura;
- Estabilidade;
- Tempo de resposta;
- Garantia de leitura.

O desempenho do instrumento é determinado tendo em conta as características técnicas mencionadas anteriormente, sendo o alcance, a resolução, a precisão e a repetibilidade, as características mais importantes.

---

O alcance é definido pelo intervalo entre o maior e o menor valor de leitura que o equipamento é capaz de registrar. A resolução corresponde à menor alteração que pode ser captada pelo instrumento de leitura. Geralmente, a resolução diminui com o aumento do alcance. A precisão e a repetibilidade são características muito importantes, a precisão representa o quão próximas várias leituras sucessivas estão de uma leitura média e a repetibilidade define qual é o intervalo temporal entre duas leituras consecutivas; quanto maior for a repetibilidade menor será o tempo entre duas leituras consecutivas.

Os equipamentos, quando adquiridos, são acompanhados de manuais de instrução fornecidos pelo fabricante, onde se encontram referidos os parâmetros medidos pelo respectivo equipamento, o seu campo de aplicação e as suas especificações técnicas.

Também podem ocorrer erros durante a leitura dos instrumentos; estes apresentam diferentes causas e encontram-se divididos pelos seguintes tipos (Rocha, 2014):

- **Erros grosseiros**, estes erros encontram-se associados a inexperiência da pessoa responsável pela leitura, a falhas na leitura ou no registo e a erros computacionais;
- **Erros sistemáticos**, ocorrem devido a problemas de calibração do equipamento, pela não utilização e por procedimentos de leitura consistentes;
- **Erros de conformidade**, são consequência de uma incorreta instalação e da limitação dos instrumentos de monitorização selecionados;
- **Erros ambientais**, estes erros são causados pelos efeitos que o clima, a temperatura e as vibrações têm sobre os instrumentos de leitura ou sobre a estrutura;
- **Erros observacionais**, ocorrem principalmente devido à alteração dos observadores;
- **Erros de amostragem**, são consequência de incorretas técnicas de amostragem e da falta de instrumentos instalados em locais representativos;
- **Erros aleatórios**, estes ocorrem devido ao ruído e ao atrito.

Todos os equipamentos, após serem instalados, requerem análises regulares, de forma a verificar o seu correto funcionamento e a aferir se existe necessidade de realizar uma operação de calibração. As operações de calibração e de manutenção dos equipamentos devem ser realizadas de forma regular e devem ser planeadas de acordo com a vida útil dos equipamentos de monitorização.

---

### 3.2.1. Métodos de monitorização de deslocamentos superficiais

Os métodos de observação de deslocamentos superficiais englobam:

- Topográficos;
- Geodésicos.

A distinção principal entre os métodos topográficos e os métodos geodésicos relaciona-se com o grau de precisão que ambos os métodos apresentam. Sendo que os métodos topográficos apresentam uma precisão na ordem dos centímetros e os métodos geodésicos uma precisão na ordem dos milímetros.

Ambos os métodos utilizam o mesmo conjunto de grandezas para determinar a posição do ponto em monitorização, ângulos horizontais e verticais, distâncias e desníveis.

O início dos trabalhos de monitorização corresponde à realização de leituras de referência em cada um dos pontos em observação; estes dados serão posteriormente utilizadas como referências para a determinação das variações das grandezas, através da comparação entre as leituras realizadas e a tomada como referência, obtendo-se assim o deslocamento ocorrido entre as duas. Se a leitura de referência apresentar um erro na sua observação, todas as leituras posteriores serão influenciadas pelo mesmo erro.

A rede de observação pode ser constituída por pontos materializados por pilares solidarizados, alvos refletivos autocolantes, prismas ou mini prismas. Estes encontram-se presentes na Figura 19.



Figura 19. Pontos de observação: A) – Pilar solidarizado; B) – Prima e mini prisma; C) – Alvo refletor; (adaptado de Torres, 2010 e de Raposo, 2011)

---

Os prismas e os mini prismas apresentam menores erros associados à leitura, quando comparados com os restantes, uma vez que estes permitem que o aparelho de leitura encontre o centro do prisma.

Os pontos utilizados durante a leitura podem ser classificados, segundo a sua função (Raposo, 2011):

- **Pontos objeto**, correspondem aos pontos cujos deslocamentos se pretendem determinar;
- **Pontos de referência**, pontos a partir dos quais se determinam os deslocamentos dos pontos objeto;
- **Pontos auxiliares**, estes são acrescentados com o objetivo de melhorar a configuração geométrica;
- **Pontos alvo**, são utilizados apenas para serem visados;
- **Pontos estação**, estes são utilizados para estacionar os equipamentos de leitura e deverão ser localizados em zonas fora da área de influência da estrutura em observação;

Os equipamentos de observação utilizados para medir as grandezas englobam:

- Teodolitos;
- Distanciómetros Eletromagnéticos (DEM);
- Taqueómetros, que consistem em teodolitos eletrónicos equipados com um distanciómetro eletromagnético;

A Figura 20 apresenta os equipamentos de observação referidos anteriormente.

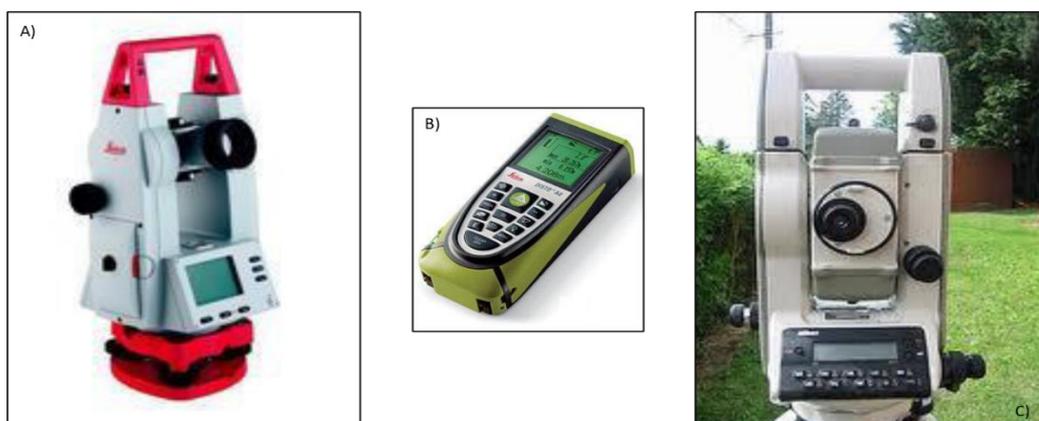


Figura 20. Equipamentos de observação: A) – Teodolito; B) – DEM; C) – Taqueómetro; (adaptado de Raposo, 2011)

---

Estes métodos possibilitam a determinação da deformação tridimensional, isto é, da deformação em três direções ortogonais (x, y e z). São geralmente utilizados em soluções de contenção, em taludes, túneis e em estruturas adjacentes a estrutura geotécnica.

Na medição de deslocamentos superficiais podem ocorrer alguns valores anómalos, devido a variação dos parâmetros atmosféricos, tais como a temperatura, pressão e humidade; estes efeitos podem ser minimizados, efetuando leituras em períodos do dia mais adequados.

### 3.2.2. Métodos de monitorização de deslocamento internos

Os métodos de observação de deslocamentos internos englobam (Coimbra, 2019):

- Inclínómetros:
  - Inclínómetros verticais;
  - Inclínómetros horizontais;
  - Inclínómetros fixos;
- Extensómetros:
  - Extensómetros de cana;
  - Extensómetros magnéticos;
  - Extensómetros estruturais;
  - Extensómetro incremental (Increx);
  - Extensómetros Sondex;

Os inclinómetros são um instrumento que permite medir deslocamento internos, são constituídos por um tubo inclinométrico, um torpedo e uma unidade de leitura.

Os inclinómetros verticais são instrumentos que permitem medir deslocamentos horizontais que afetam a forma do invólucro do tubo inclinométrico incorporado no terreno ou na estrutura. O tubo inclinométrico é instalado verticalmente para a maioria das aplicações, de modo a medir deslocamentos horizontais; contudo, em alguns casos, podem ser instalados em furos inclinados (inclinação limitada a 30º da vertical).

Os inclinómetros horizontais são utilizados com o objetivo de se obterem perfis de assentamento ou de elevações. São geralmente utilizados para monitorização de assentamentos e elevações por baixo de tanques de armazenamento, de aterros, de barragens e de aterros sanitários. As principais vantagens deste equipamento são a obtenção de perfis de assentamentos completos, fácil

---

manuseamento e fiabilidade. As principais desvantagens encontram-se associadas ao custo do equipamento, leitura lenta, limites de comprimento e vistoria ótica necessária para medições exatas.

Os sistemas de inclinómetros fixos são utilizados para a recolha de dados e monitorização remota, permitindo o controlo de movimentos horizontais e verticais. Este sistema consiste numa sequência de sensores inclinométricos instalados em permanência no interior da calha. A sequência dos sensores é definida de modo a abranger a zona onde o movimento é expectável. Estes inclinómetros são de fácil automatização e de instalação, contudo apresentam um elevado custo. São essencialmente utilizados em paredes de contenção, deformações em aterros e acompanhamento de vertentes em barragens, autoestradas e vias férreas (Coimbra, 2019).

A Figura 21 apresenta dois esquemas da implementação de inclinómetros.

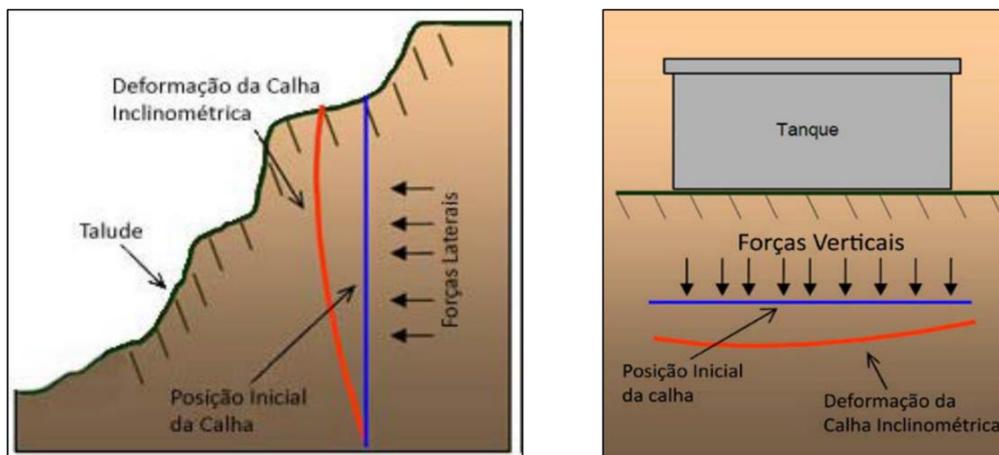


Figura 21. Esquemas representativos da implementação de inclinómetros (retirado de Torres, 2010)

A instalação dos inclinómetros inicia-se pela execução de um furo com o comprimento pretendido, onde é introduzido o tubo inclinométrico e posteriormente o espaço entre o furo e o tubo é selado com calda de cimento.

A monitorização é feita através da introdução do torpedo metálico que é descido até ao fundo do tubo inclinométrico, onde se inicia a leitura, que progride no sentido ascendente. No interior do torpedo estão posicionados um ou dois acelerómetros que captam e transmitem os dados para a unidade de leitura. O deslocamento representa a diferença da posição do tubo, sendo o deslocamento calculado através da subtração entre o desvio inicial e o desvio atual. Os *outputs* obtidos são dois tipos de deslocamentos, os incrementados e os acumulados.

Os extensómetros são instalados em furos, de forma a monitorizar deslocamentos a várias profundidades. Os extensómetros podem diferir quanto à conceção, mas são iguais quanto ao

---

conceito pois medem deslocamentos internos que ocorram ao longo do seu eixo, podendo as varas serem constituídas por fibra de vidro, aço inoxidável, ferro comum, ou âncora fixa à rocha ou solo (Torres, 2010). A sua instalação consiste na execução de um furo até à cota de instalação, de seguida é realizada a sua selagem, solidarizando as varas com o terreno e permitindo ao mesmo tempo o movimento livre para cada vara. Os deslocamentos são medidos na cabeça do extensómetro com auxílio de um defletómetro/micrómetro ou através da adoção de equipamentos capazes de realizar a leitura automatizada.

Os extensómetros têm como objetivo a obtenção de informação sobre deslocamentos que possam ocorrer na envolvente onde se encontram. Os extensómetros são usados na monitorização de deslocamentos em escavações, fundações e à superfície de zonas de construção de túneis e na monitorização de deslocamentos em aterros.

Os extensómetros magnéticos podem ser instalados na vertical ou na horizontal, consistem numa sonda, uma fita graduada e um determinado número de anéis magnéticos que estão posicionados ao longo do tubo. Os anéis magnéticos encontram-se solidarizados com o terreno e movem-se conforme o terreno se desloca. A leitura é executada descendo a sonda pelo tubo que deteta a posição dos anéis magnéticos e, posteriormente, verifica-se a profundidade.

O extensómetro estrutural foi projetado para medir deformações em elementos estruturais de aço, utilizando o princípio da corda vibrante para realizar as leituras. O equipamento é fixado ao elemento através de soldadoras, de modo a que o aumento ou diminuição das deformações do elemento estrutural faça alterar a tensão da corda vibrante.

O extensómetro incremental, junta a tecnologia utilizada nos inclinómetros com a utilização de um extensómetro, tendo um campo de aplicação idêntico a estes. Estes equipamentos são constituídos por anéis metálicos instalados em tubos inclinométricos que são solidarizados com o maciço por preenchimento com calda de cimento. As leituras sucessivas permitem a determinação de eventuais deslocamentos verticais dos anéis e a movimentação do tubo é observada permitindo assim a monitorização dos deslocamentos horizontais.

O extensómetro Sondex apresenta um funcionamento similar ao anterior, contudo tem a vantagem de as medições não indicarem apenas os assentamentos totais, mas também o assentamento incremental à profundidade de cada anel.

A Figura 22 apresenta de forma esquemática a implementação dos diferentes extensómetros.

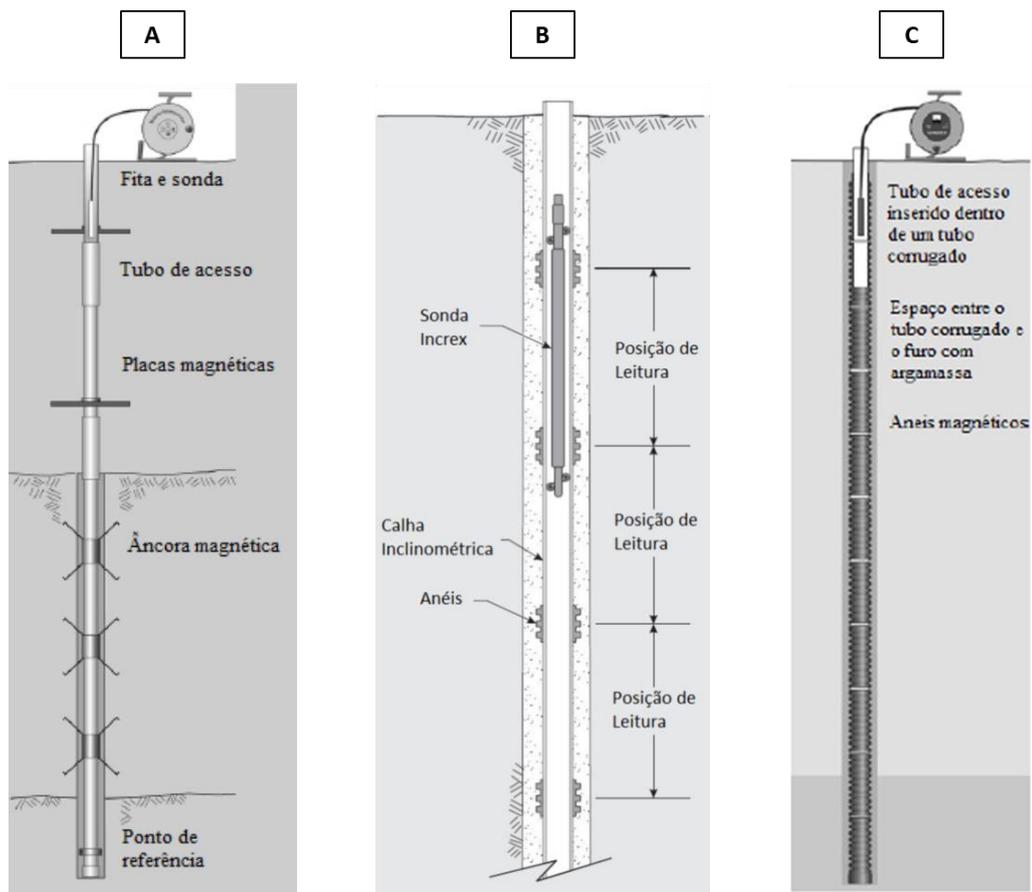


Figura 22. Extensómetros: A) – Extensómetro magnético; B) – Extensómetro Incrementado; C) – Extensómetro Sondex; (adaptado de Torres, 2010 e de Rocha, 2014)

### 3.2.3. Métodos de monitorização de assentamentos

Os métodos de observação de assentamentos englobam:

- Células de assentamento;
- Réguas de nivelamento;
- Marcas de nivelamento;
- Extensómetros de assentamentos;

As células de assentamento podem apresentar um sistema hidráulico ou de corda vibrante, ambos são constituídos pelos mesmos componentes principais, um reservatório, um tubo com líquido e um transdutor de pressão. O transdutor é colocado por baixo do aterro e assenta em conjunto com o terreno de fundação, e mede em simultâneo a pressão da coluna de líquido no tubo. A altura da coluna do líquido aumenta com o assentamento do transdutor e o transdutor deteta o aumento da pressão, possibilitando assim a determinação do assentamento ocorrido.

A leitura das marcas de nivelamento e das réguas de nivelamento é realizada tendo por base um ponto que se encontra fora da área de influência da estrutura. Neste ponto é instalado uma marca de referência, que será então utilizada como referência para as restantes; desta forma, é então possível medir os assentamentos da estrutura. As réguas de nivelamento, que são uma alternativa às marcas para edifícios, permitem medir os deslocamentos verticais através de nivelamento geométrico de precisão.

O extensómetro de assentamento é um equipamento utilizado para monitorizar grandes assentamentos em solos moles, por baixos de aterros. Quando o terreno assenta, o potenciómetro que se encontra no interior da cabeça do equipamento mede a perda de tensão de um cabo tensionado, sendo as leituras obtidas remotamente. A principal desvantagem deste equipamento encontra-se associada ao seu elevado custo.

A Figura 23 apresenta esquemas representativos dos instrumentos para a monitorização de assentamentos.

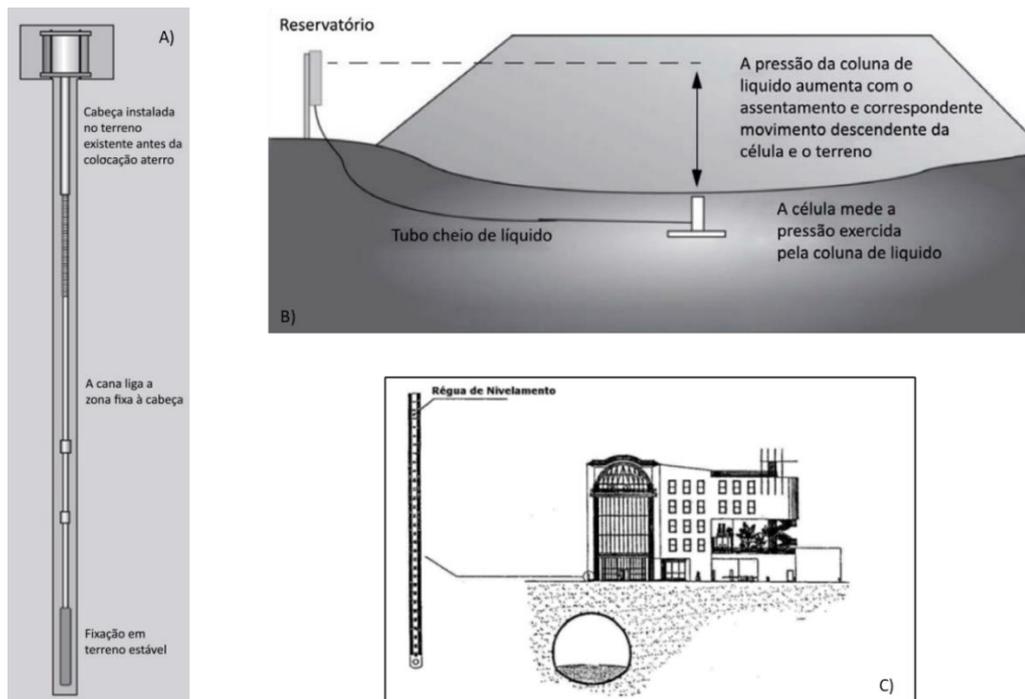


Figura 23. Equipamentos de monitorização de assentamentos: A) – Extensómetro de assentamentos; B) – Células de assentamento; C) – Réguas de nivelamento; (adaptado de Torres, 2010)

---

### 3.2.4. Métodos de monitorização de deformações várias

Os métodos de observação de deformações várias englobam:

- Extensómetros de fita

Os extensómetros de fita são utilizados para medir distâncias com precisão entre pares de pontos. Este equipamento é constituído por uma fita de medição com um dispositivo de tensionamento hidráulico, possuindo um local onde é possível observar as leituras. Este instrumento é geralmente implementado na monitorização de convergências em túneis, poços, escavações subterrâneas e caves.

Para a medição de convergências em túneis ou em caves também podem ser utilizados alvos topográficos, colocados na parede ou no suporte das escavações subterrâneas.

A Figura 24 apresenta o instrumento extensómetro de fita.



Figura 24. Extensómetro de fita (retirado de Slope Indicator, 2020)

### 3.2.5. Métodos de monitorização de inclinações e rotações

Os métodos de monitorização de inclinações e de rotações englobam:

- Sensores de viga;
- Clinómetros;
- Sistema de pêndulo;
- *Tiltmeter*;

Os sensores de viga monitorizam movimentos diferenciais e de rotação em estruturas, podendo ser utilizados na horizontal, com o objetivo de detetar movimentos de assentamento e de elevação, ou na vertical com o objetivo de monitorizar movimentos laterais e deformações. Este equipamento

pode ser utilizado para monitorizar soluções de estabilização, avaliar o efeito de escavações em estruturas, monitorizar a flexão e a deformação em muros de contenção e observar movimentos em túneis. O sensor de viga consiste num sensor de inclinação, eletrónico, associado a um sistema elétrico que emite uma determinada voltagem proporcional à inclinação detetada no sensor; estes são agregados geralmente a uma barra de metal.

Os clinómetros permitem medir as inclinações e avaliar a sua variação e são geralmente colocados em edifícios. As principais vantagens deste equipamento é o seu baixo custo, fácil instalação e utilização; a sua limitação está associada ao facto de apenas permitir observar inclinações.

Os sistemas de pêndulo são geralmente aplicados para o controlo de movimento horizontais associados a rotação e inclinação de estruturas, em barragens, pontes, torres e edifícios altos.

O “tiltmeter” funciona através de uma força equilibrada de servo-acelerómetro que mede a inclinação da estrutura. Estes equipamentos podem ser utilizados na monitorização de mudanças na inclinação em muros de contenção, avaliar o desempenho de pontes, vigas e barragens que estejam sobre carga. Podem também fornecer um aviso prévio de potenciais danos estruturais.

Na Figura 25 encontram-se apresentados os instrumentos mencionados anteriormente.

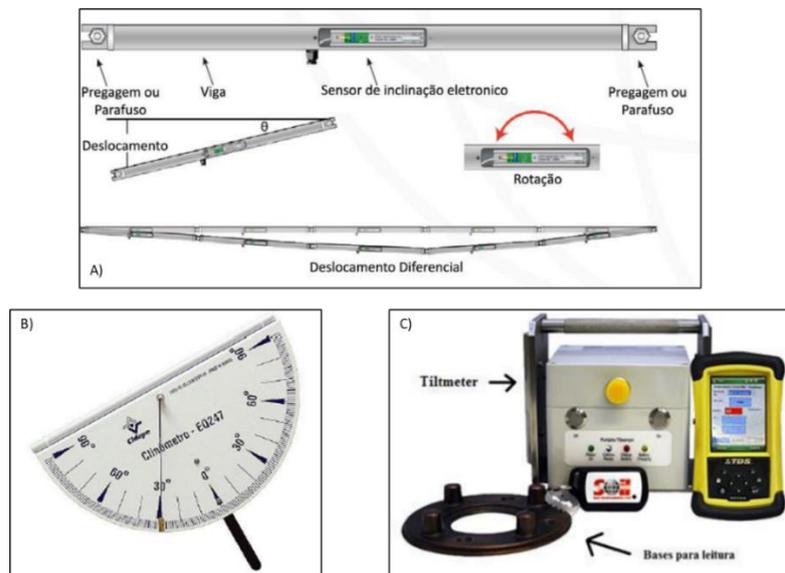


Figura 25. Equipamentos de medição de inclinações e rotação: A) – Sensores de Viga; B) – Clinómetros; C) – Tiltmeter (adaptado de Torres, 2010 e de Rocha, 2014)

---

### 3.2.6. Métodos de monitorização de juntas e fissuras

Os métodos de observação de juntas e fissuras englobam:

- Fissurómetros:
  - Fissurómetros “*Tell-Tale*”;
  - Fissurómetros de corda vibrante;
  - Fissurómetros tridimensionais;

Os fissurómetros são instrumentos que são aplicados quando se pretende monitorizar fissuras superficiais e juntas em estruturas de betão ou rocha. A escolha do tipo de fissurómetro depende da acessibilidade para realizar a leitura, da precisão pretendida, da amplitude esperada do movimento e do custo.

Os fissurómetros “*Tell-Tale*” são constituídos por duas placas sobrepostas em parte do seu comprimento, a placa inferior encontra-se calibrada em milímetros e a placa superior é transparente. Na placa transparente é realizada uma linha que serve de referência às seguintes leituras; quando a largura da fissura muda, uma placa move-se relativamente à outra, sendo a diferença entre a linha de referência e a escala da placa inferior o deslocamento ocorrido.

Os fissurómetros de corda vibrante consistem num sensor de deslocamento de corda vibrante e num conjunto de pinos de fixação que são colocados em cada um dos lados da fissura. A leitura inicial estabelece uma referência e as leituras subseqüentes são comparadas com esta para determinar a magnitude dos deslocamentos.

A Figura 26 apresenta os instrumentos de monitorização de juntas e fissuras referidos.

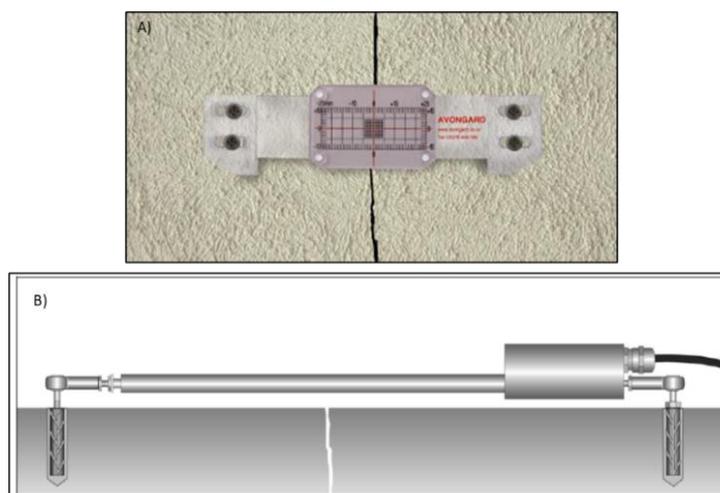


Figura 26. Equipamentos de monitorização de juntas e fissuras: A) – Fissurómetro “*Tell-Tale*”; B) - Fissurómetros de corda vibrante; (adaptado de Slope Indicator e SES, 2020)

---

O fissurómetro tridimensional apresenta o mesmo funcionamento e leitura do fissurómetro de corda vibrante, com a diferença de permitir avaliar os deslocamentos de forma tridimensional (x, y e z).

### 3.2.7. Métodos de monitorização de tensões e pressões

Os métodos de monitorização de tensões para elementos estruturais englobam:

- Células de carga:
  - Células de carga elétricas;
  - Células de carga hidráulica;

As células de carga consistem em transdutores que permitem converter pressões em impulsos elétricos, são implementadas para a monitorização das variações das tensões exercidas por ancoragens e outros elementos estruturais. As células de carga são utilizadas em estruturas ancoradas e outras soluções de contenção com o objetivo de observar as cargas exercidas por estes elementos, tanto na fase de obra, para o controlo de qualidade da execução, ou durante a fase de exploração, para garantir que estes elementos continuam em correto funcionamento.

A Figura 27 apresenta um esquema de implementação de uma célula de carga.

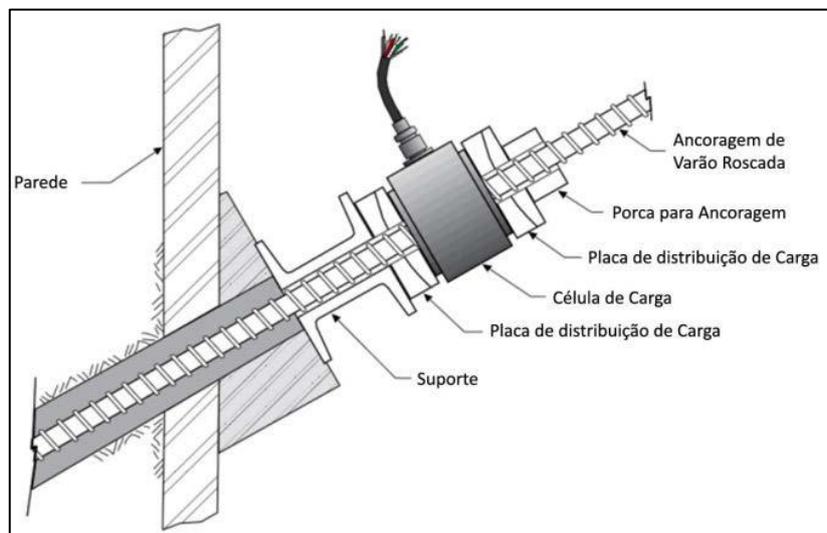


Figura 27. Esquema de implementação de célula de carga (retirado Torres, 2010)

As células de carga são instaladas após o tensionamento das ancoragens com o objetivo de controlar as perdas ou incrementos do pré-esforço ao longo da vida da estrutura.

---

Uma perda de carga numa determinada célula pode permitir identificar uma falha da ancoragem ou perda de material na zona posterior do muro. A situação contrária, ou seja, um aumento de carga pode significar que a estrutura necessita de ser intervencionada para evitar que a mesma entre em rotura, que as ancoragens ao redor desta podem estar com problemas ou que a estrutura se encontra carregada em excesso.

Os métodos de monitorização de pressões do terreno sobre a estrutura englobam:

- Células de pressão total;
- Células de pressão de corda vibrante;
- Estações de pressão;

As células de pressão total permitem monitorizar as pressões exercidas pelo terreno sobre uma determinada estrutura, geralmente são implementadas com o objetivo de verificar os pressupostos de projeto e controlar se a pressão exercida pelo terreno excede os valores para os quais a estrutura foi dimensionada.

As estações de pressão são concebidas para serem utilizadas em furos em solo ou em rocha branda, estes instrumentos são constituídos por células de pressão orientadas em um, dois ou três eixos.

A Figura 28 apresenta os instrumentos de medição de pressões mencionados anteriormente.

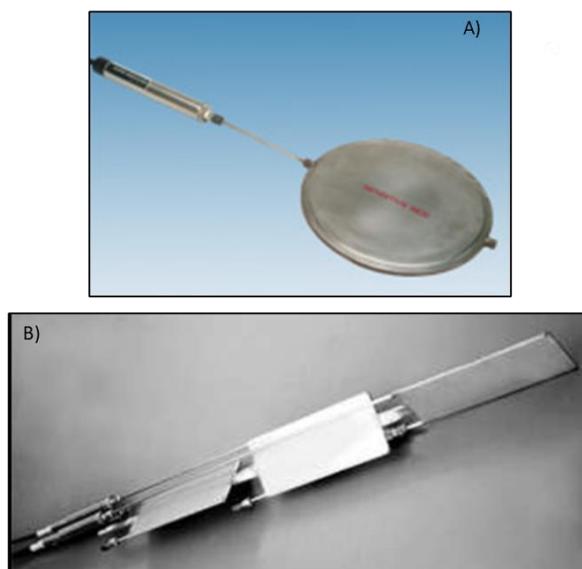


Figura 28. Equipamentos de monitorização de pressões: A) – Células de pressão total; B) – Estações de pressão; (adaptado de Slope Indicator, 2020)

---

Estes equipamentos são implementados na monitorização da pressão total (tensão efetiva do terreno e tensão neutra nos vazios) exercida sobre uma estrutura, na determinação da magnitude, distribuição e orientação das pressões, na medição da pressão de contacto em arcos e fundações.

### *3.2.8. Métodos de monitorização de grandezas relativas à água*

Os métodos de monitorização de grandezas relativas à água englobam:

- Infiltrómetros:
  - Infiltrómetros de anel;
  - Infiltrómetros de Guelph;
- Pluviómetros;
- Piezómetros:
  - Piezómetros de Casagrande;
  - Piezómetros de corda vibrante;
  - Piezómetros pneumáticos;

Os infiltrómetros de anel são um instrumento simples que permite determinar a capacidade de infiltração de um solo, sendo este valor definido como a quantidade de água que penetra no solo em função da área superficial e em função do tempo. Com base nas leituras efetuadas com este equipamento, e aplicando a lei de Darcy, é possível, então, obter este valor.

Os infiltrómetros tipo Guelph permitem estabelecer a permeabilidade do solo; este equipamento é instalado após a execução de uma pequena perfuração do solo. Após a instalação do equipamento deixa-se fluir a água para o interior da perfuração realizada, sendo obtida a permeabilidade do terreno, quando a absorção se equilibra (Espinha Marques et al., 2016).

Os pluviómetros permitem observar a quantidade e a intensidade de precipitação que ocorre num determinado local e durante um certo tempo. A ideia base deste tipo de dispositivo consiste em medir a quantidade de chuva, pela altura em milímetros que alcançaria a água num solo perfeitamente horizontal e sem nenhuma infiltração ou perdas numa determinada área.

A Figura 29 apresenta um exemplo de um infiltrómetro e de um pluviómetro.

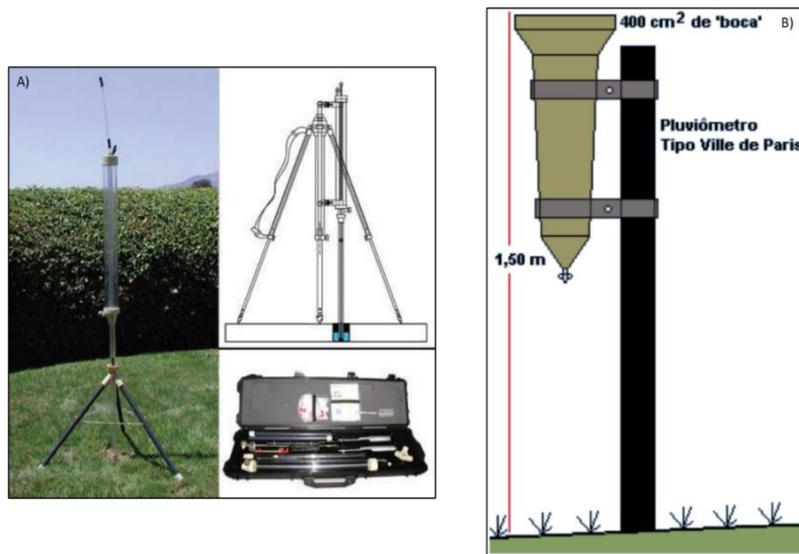


Figura 29. Equipamento de monitorização de grandezas relativas à água: A) – Infiltrómetro de Guelph; B) – Pluviómetro; (adaptado de Torres, 2010)

Os piezómetros são instrumentos de monitorização que permitem realizar a medição da pressão hidrostática e do nível freático nos terrenos. Existem dois tipos de piezómetros, os piezómetros de tubo ascendente e os piezómetros com diafragma.

O uso de piezómetros como instrumentos de monitorização permite obter informação sobre a posição do nível freático e a sua variação ao longo do tempo; a obtenção destes dados é fundamental para a verificação da estabilidade de taludes, para a elaboração de projetos e na fase de construção de estruturas geotécnicas.

Os piezómetros de Casagrande são constituídos por um filtro de ponta de alta porosidade por onde a água pode circular livremente, ligado a um tubo vertical que comunica com a superfície. Desta forma, o aumento ou decréscimo da pressão hidráulica irá fazer com que o nível da água suba ou desça no interior do tubo. A leitura é realizada através de um indicador do nível da água, que é constituído por um torpedo, contendo uma chave elétrica, um fio graduado e um carretel. Quando o torpedo atinge o nível de água, o circuito elétrico fecha-se e é emitido um sinal sonoro, seguindo-se a leitura direta da profundidade a que se encontra o torpedo através do fio graduado.

Os piezómetros de corda vibrante permitem observar a pressão de água; estes são constituídos por um diafragma, um cabo de aço tensionado e uma bobina eletromagnética. Quando ocorre um aumento da pressão, o diagrama sofre uma deformação o que leva a uma mudança na tensão do cabo. A vibração do cabo junto da bobina gera uma determinada frequência que é transmitida

através de um cabo elétrico até um aparelho de leitura. Este equipamento apresenta elevada precisão e sensibilidade, contudo apresenta uma vida útil limitada.

Os piezômetros pneumáticos permitem determinar a pressão intersticial em solos saturados; estes são constituídos por dois tubos gémeos e um diafragma, que funciona como uma válvula, que é acionada com a variação da pressão da água e do gás. A leitura é realizada com a introdução de gás à superfície por um dos tubos, com a injeção a pressão do gás aumenta o que obriga o diafragma a afastar-se, podendo assim o gás passar para o outro tubo e voltar à superfície. Quando o gás é observado à superfície o fornecimento de gás é desligado. Quando o diafragma volta à posição inicial, é registrada a pressão do gás através de um manómetro.

A Figura 30 apresenta os diferentes piezômetros mencionados.

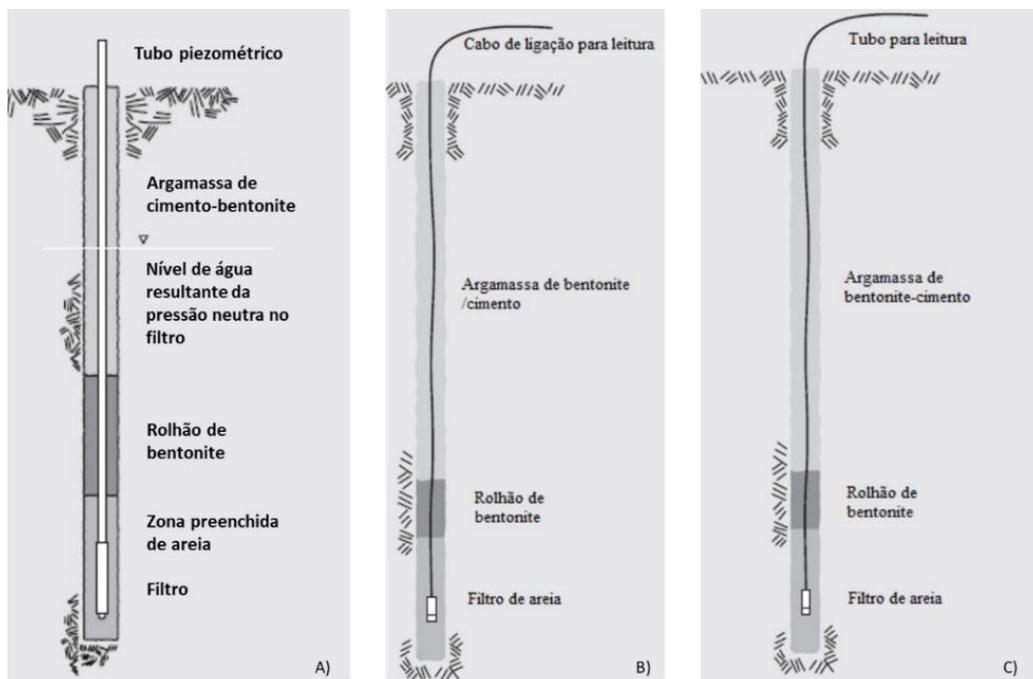


Figura 30. Piezômetros: A) – Piezômetro Casagrande; B) – Piezômetro de corda vibrante; C) – Piezômetro pneumático (adaptado de Rocha, 2014)

Os piezômetros podem ser implementados com o objetivo de monitorizar as pressões intersticiais, os efeitos da utilização de sistemas de rebaixamento e de melhoramento, e na monitorização de níveis de água.

---

### 3.2.9. Equipamentos de medição e registo de vibrações

Os sismógrafos são o principal instrumento para medição e registo de vibrações. Este equipamento consiste num sensor (geofone) que deteta e amplifica os movimentos e uma unidade de gravação, que posteriormente reproduz os movimentos num sismograma. Os sismógrafos permitem detetar movimentos vibratórios em três direções, vertical, longitudinal e transversal.

A utilização de um *software* apropriado permite tratar os dados registados, possibilitando a obtenção da velocidade de pico máxima, a velocidade máxima em cada direção e a frequência de vibração nas três direções, sendo o valor de pico deste último parâmetro o mais importante no que diz respeito à segurança das estruturas vizinhas.

A utilização destes instrumentos está associada à maioria das obras geotécnicas que envolve a formação de vibrações provenientes de escavação com recurso a explosivos, escavações mecânicas, realização de furos de sondagem, cravação de estacas e construção de estruturas. Todos estas operações criam e transmitem vibrações, que podem afetar uma grande variedade de alvos, tais como infraestruturas e edifícios.

A Figura 31 apresenta um exemplo de um sismógrafo.



Figura 31. Equipamento de medição e registo de vibrações – sismógrafo (retirado de VMA, 2015)

---

### 3.2.10. Outros métodos de monitorização

Existem diversos outros equipamentos e métodos de monitorização que podem ser aplicados com o objetivo de controlar o comportamento de estruturas geotécnicas (Giordan et al., 2020):

- *Global Navigation Satellite System* (GNSS);
- *Synthetic Aperture Radar* (SAR);
- Varrimentos laser;
- Fotogrametria;
- Veículos aéreos não-tripulados (VANT);
- Sensores de fibra óptica.

O GNSS é um sistema de posicionamento e navegação que recorre ao conjunto de satélites que se encontram em órbita. Este método apresenta diversas aplicações com diferentes níveis de precisão. Quando as coordenadas são obtidas de uma forma relativa é possível obter uma precisão milimétrica, permitindo assim que este método seja utilizado para o controlo do comportamento de estruturas geotécnicas.

O sistema GNSS consiste em três segmentos diferentes, o segmento espacial, constituído pelos satélites que se encontram em órbita, o segmento de controlo operacional, constituído pelas estações recetoras e o segmento do recetor, constituído pelo hardware e software utilizados para processar os sinais e medidos pelos satélites.

As maiores vantagens da utilização do GNSS estão associadas à fácil aquisição de dados, à elevada precisão e à presente viabilidade económica. A principal desvantagem deste sistema são os obstáculos que impedem os recetores de receber o sinal enviado pelos satélites, a reflexão do sinal e os atrasos sofridos devido ao atravessamento da ionosfera.

O radar de abertura sintética (SAR) é um sistema de radar de visada lateral que produz uma imagem de alta resolução da superfície da terra. Este sistema utiliza feixes largos e longos tempos de exposição, o que permite melhorar a resolução. A utilização deste sistema de radar tem várias aplicações, como no controlo de possíveis deslizamentos e na monitorização de estruturas geotécnicas.

As principais vantagens da utilização desta técnica de monitorização são, tratar-se um método não intrusivo, de baixo custo de aplicação e que apresenta uma grande precisão.

---

A técnica de varrimento Laser/Lidar utiliza uma tecnologia que permite medir o tempo que as reflexões dos feixes de luz emitidos levam a ser detetadas por um sensor. Através de um feixe de luz laser são determinadas as distâncias entre o scanner laser e a superfície a ser topografada, permitindo assim obter uma nuvem de pontos georreferenciados da superfície. As coordenadas tridimensionais do alvo são determinadas através da diferença do tempo da emissão e da receção do feixe de luz, do ângulo em que o feixe de luz é emitido e recolhido, e do posicionamento do equipamento em relação à superfície da Terra (Giordan et al., 2020).

Esta técnica pode ser implementada através de plataformas aéreas, plataformas móveis e em plataformas terrestres, sendo que as plataformas fixas apresentam uma maior precisão, contudo encontram-se limitadas no alcance. Para além de possibilitar o levantamento das coordenadas de um elevado número de pontos, através da utilização de um software apropriado, é possível desenvolver modelos 3D das superfícies observadas (Giordan et al., 2020).

O varrimento laser permite observar deformações com um grau de incerteza que pode atingir os milímetros. Contudo a incerteza irá depender das especificações do equipamento utilizado e dos procedimentos implementados, como por exemplo a distância a que o equipamento se encontra da estrutura alvo.

A observação dos deslocamentos com a utilização desta tecnologia de uma determinada estrutura é realizada através da comparação entre o varrimento realizada inicialmente e os varrimentos realizadas em períodos posteriores, com utilização de um software apropriado.

A Figura 32 apresenta a aplicação da técnica de varrimento laser numa superfície.



Figura 32. Aplicação da técnica de Varrimentos Laser (retirado de Martins, 2018)

---

A fotogrametria é a disciplina que se ocupa da medição, análise e interpretação de fotogramas, com vista à classificação e determinação da posição e dimensões reais dos objetos neles representados. A fotogrametria divide-se em duas fases principais, a primeira engloba o voo fotográfico e a segunda a georreferenciação das fotografias obtidas (Giordan et al., 2020).

O principal objetivo da fotogrametria é a reconstrução de um espaço tridimensional, tendo por base imagens bidimensionais, retiradas através da realização de um sobrevoo da área em monitorização. Este método não oferece precisões muito elevadas, contudo pode ser implementado para a observação de movimentos em terrenos. Para se obterem maiores precisões podem ser instaladas marcas de referência no terreno (Giordan et al., 2020).

Os VANT podem ser considerados como uma alternativa de mais baixo custo para a fotogrametria aérea clássica, substituindo os aviões e helicópteros, e um complemento para os métodos de levantamento com laser terrestre. Estes equipamentos possuem elevada capacidade de obter grande quantidade de fotografias de forma rápida, para uma pequena área, a partir de baixas altitudes, de diferentes ângulos e para grandes áreas, através da sobreposição de imagens. Estes equipamentos podem ser utilizados como plataformas para transportar variados equipamentos, como câmaras e sensores (Giordan et al., 2020).

Atualmente, a utilização de VANT para o mapeamento de pequenas áreas apresenta-se como uma técnica com uma ótima relação custo-benefício, principalmente no que se refere ao baixo investimento, rápido tempo de processamento e redução do número de elementos necessários, apresentando resultados consistentes (Borges et al., 2017). A Figura 33 apresenta a aplicação de VANT no mapeamento.

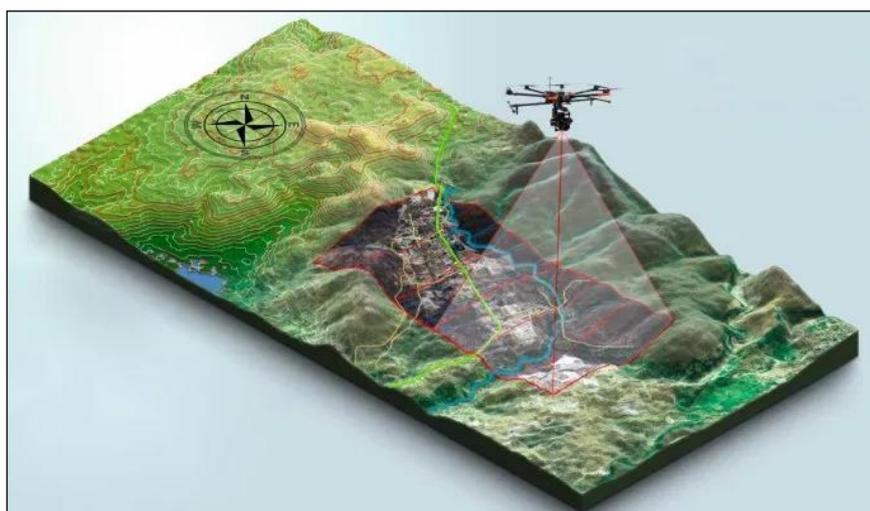


Figura 33. Aplicação de VANT (retirado de GeoSensori, 2020)

---

Os parâmetros de voo e a área a sobrevoar pelo equipamento são planeados e definidos previamente, através da utilização de um programa. Desta forma o equipamento irá realizar o voo de forma autónoma, só sendo necessário levantar e pousar o equipamento através do comando. O processamento das imagens é executado através de software adequado, que permite gerar ortofotomapas georreferenciados e modelos 3D. A utilização de VANT em Portugal encontra-se regulamentada pelo regulamento nº. 1093/2016, de 24 de novembro, que impõe regras na utilização deste equipamento para fins recreativos e profissionais.

Nos métodos de monitorização referidos anteriormente, a obtenção dos deslocamentos é realizada através da comparação entre dois levantamentos realizados em datas diferentes, obtendo-se assim os deslocamentos ocorridos durante um determinado período nas três direções (x, y e z).

Atualmente, existem diversos equipamentos de monitorização que utilizam várias tecnologias e propriedades ópticas para a avaliação de diferentes grandezas, com recurso à medição da variação das propriedades da luz transportada nas fibras óticas, tais como, a sua intensidade, frequência, comprimento de onda, fase e polaridade. Os sensores baseados em fibra óptica têm demonstrado excelentes atributos para a medição de parâmetros mecânicos, físicos e químicos (Rodrigues, 2011).

A fibra óptica consiste num filamento de vidro de alta dureza, muito compacta, fabricada a altas temperaturas com base em sílica, que apresenta a capacidade de se deixar atravessar por um feixe luminoso. As principais vantagens de utilizar um equipamento com sensor de fibra ótica é a sua imunidade à corrosão, a sua dimensão reduzida e a elevada sensibilidade e estabilidade ao longo do tempo. As principais desvantagens encontram-se associadas ao elevado custo de todos os componentes, maior dificuldade na sua instalação e a fragilidade das fibras.

As principais aplicações de sensores de fibra ótica englobam medição de tensões e de deslocamentos, observação de humidade e percolação de água, e medições de pressões e forças.

Existem ainda diversos outros equipamentos/instrumentos de monitorização, como os sensores de temperatura, medidores de tensões em solos (*Soil Strainmeter*), sonómetros, sondas de assentamento para calhas inclinométricos, entre outros, que apresentam aplicações de carácter mais específico.

É importante salientar que apenas uma correta utilização e interpretação dos dados resultantes da observação e da instrumentação implementada nas estruturas geotécnicas, podem garantir a segurança da obra durante a sua construção e durante a sua fase de exploração (Nagalli et al., 2011).

---

### **3.3. Técnicas e equipamentos de monitorização utilizados na Ascendi I.G.I.**

Anualmente, na Ascendi I.G.I. é desenvolvido um conjunto de atividades que tem como objetivo manter o nível de serviço das infraestruturas, garantindo assim a circulação dos utentes com segurança. Deste conjunto de atividades, destacam-se a realização de inspeções visuais e a leitura dos equipamentos de monitorização instalados em muros e taludes.

As inspeções visuais realizadas anualmente na Ascendi I.G.I. enquadram-se no âmbito da monitorização de infraestruturas, cujo planeamento e periodicidade é realizado de acordo com o definido no Plano de Controlo de Qualidade implementado no grupo de Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I. Esta atividade surge da necessidade de registar e monitorizar o estado dos muros e taludes, de forma a identificar eventuais anomalias e monitorizar a evolução de anomalias já registadas em inspeções anteriores (Ferreira et al., 2015a).

A implementação de campanhas de inspeção visual é de extrema importância durante a fase de exploração de estruturas geotécnicas, permitindo assim o acompanhamento da evolução do estado de manutenção e conservação das estruturas. Este conhecimento que auxilia na tomada de decisões, no que diz respeito às ações de manutenção e conservação, otimizando custos e minimizando ou mitigando a ocorrência de incidentes com consequências maiores para a estrutura, contribuindo assim, de forma expressiva, para o aumento da segurança. Este processo de levantamento de informação de campo tem como principal objetivo avaliar a necessidade de implementar ações de manutenção e/ou de conservação (Ferreira et al., 2015a).

O estado de manutenção de um talude ou de um muro é classificado de bom (A) a mau (C), em função do tipo e extensão das anomalias observadas na estrutura, às quais são associadas ações de manutenção essenciais para manter a funcionalidade e integridade dos componentes existentes. Estas ações permitem eliminar fenómenos de degradação progressiva, contribuindo assim para a redução da degradação do talude. Deste modo, as ações de manutenção são de carácter paliativo e têm como principal objetivo mitigar a existência de anomalias de reduzida complexidade. Estes trabalhos englobam desmatações, limpezas, selagens e preenchimentos localizados (Ferreira et al., 2015b).

O estado de conservação é classificado de 1 (muito bom) a 5 (muito mau), em função do tipo e extensão das anomalias para as quais são implementadas ações de conservação necessárias para repor a estabilidade global do talude. As ações desenvolvidas neste âmbito são de carácter corretivo e englobam trabalhos de reabilitação, reparação e reforço (Ferreira et al., 2015b).

---

Relativamente aos instrumentos de monitorização implementados em muros e taludes na Ascendi I.G.I. são utilizados os seguintes equipamentos:

- Alvos Topográficos;
- Células de Carga;
- Inclínómetros/Piezómetros;
- Piezómetros.

Para o acompanhamento das deformações tridimensionais de muros e taludes são utilizados, para materializar os pontos objeto, alvos topográficos do tipo mini prismas Trimble. Exceto em muros de gabiões onde são utilizados alvos do tipo “Tape Target”, uma vez que nestes existe uma maior dificuldade em fixar os alvos.

Para a criação do sistema de referência de apoio às leituras topográficas, foram instalados pontos de referência materializados por alvos topográficos do tipo “primas de reflexão total”; estes são colocados em estruturas consideradas fixas, que não sofrem deslocamentos, nas imediações dos muros e taludes a instrumentar.

Na Figura 34 encontram-se os diferentes alvos topográficos implementados no grupo de Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I.



Figura 34. Alvos topográficos: A) – Mini Prismas; B) – Tape Target; C) – Primas de reflexão total (adaptado de Relatório de Instrumentação, 2017)

De seguida, será apresentado um exemplo de um conjunto de gráficos que foram desenvolvidos com o objetivo de representar as leituras realizadas por alvos topográficos, permitindo assim facilitar a interpretação dos dados fornecidos e o tratamento das leituras realizadas. Os gráficos apresentam no eixo horizontal as datas onde ocorreram as leituras dos instrumentos e no eixo vertical os deslocamentos que foram observados na direção em questão, sendo que cada linha representa um alvo topográfico diferente.

O Gráfico 1 apresenta as leituras realizadas e o seu tratamento para os alvos topográficos instalados numa determinada estrutura, na direção X, que representa os deslocamentos horizontais que ocorrem paralelamente à superfície da estrutura.

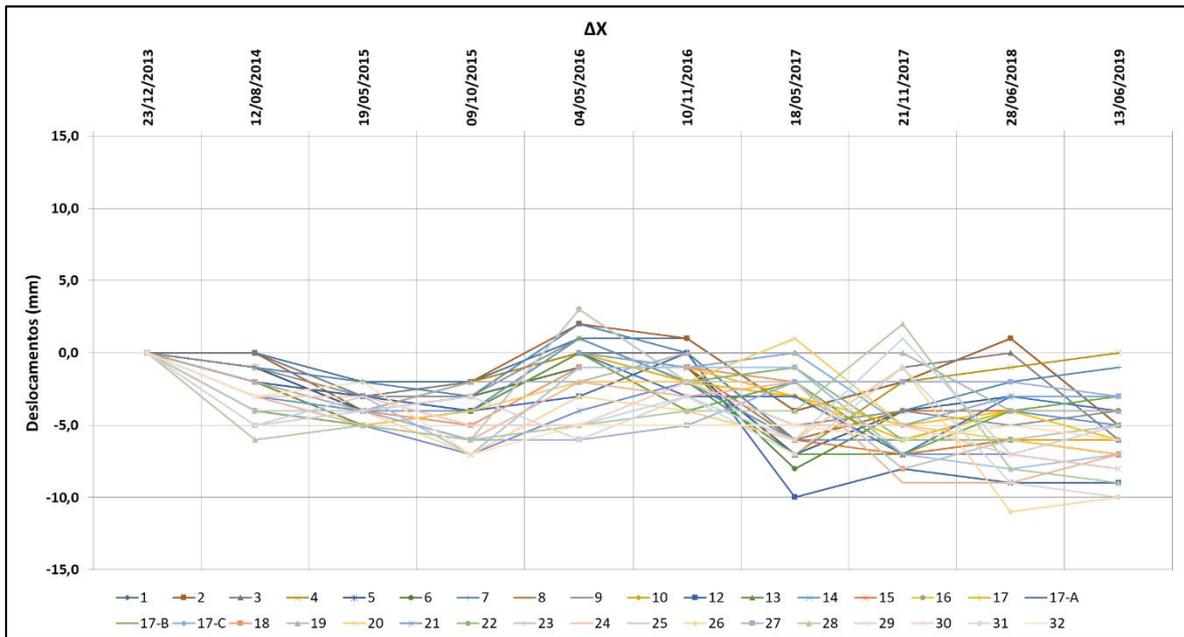


Gráfico 1. Leituras de alvos topográficos na direção X

O Gráfico 2 apresenta as leituras realizadas e o seu tratamento para os alvos topográficos instalados numa determinada estrutura, na direção Y, que representa os deslocamentos horizontais que ocorrem perpendicularmente à superfície da estrutura.

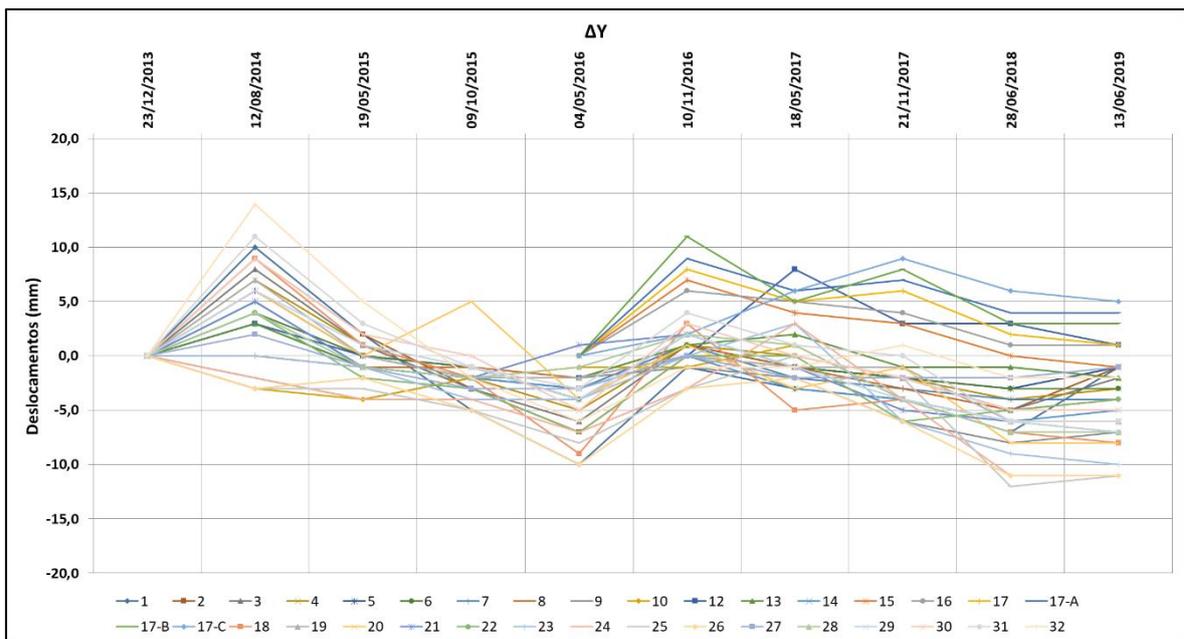


Gráfico 2. Leituras de alvos topográficos na direção Y

O Gráfico 3 apresenta as leituras realizadas e o seu tratamento para os alvos topográficos instalados numa determinada estrutura, na direção Z que representa os deslocamentos verticais.

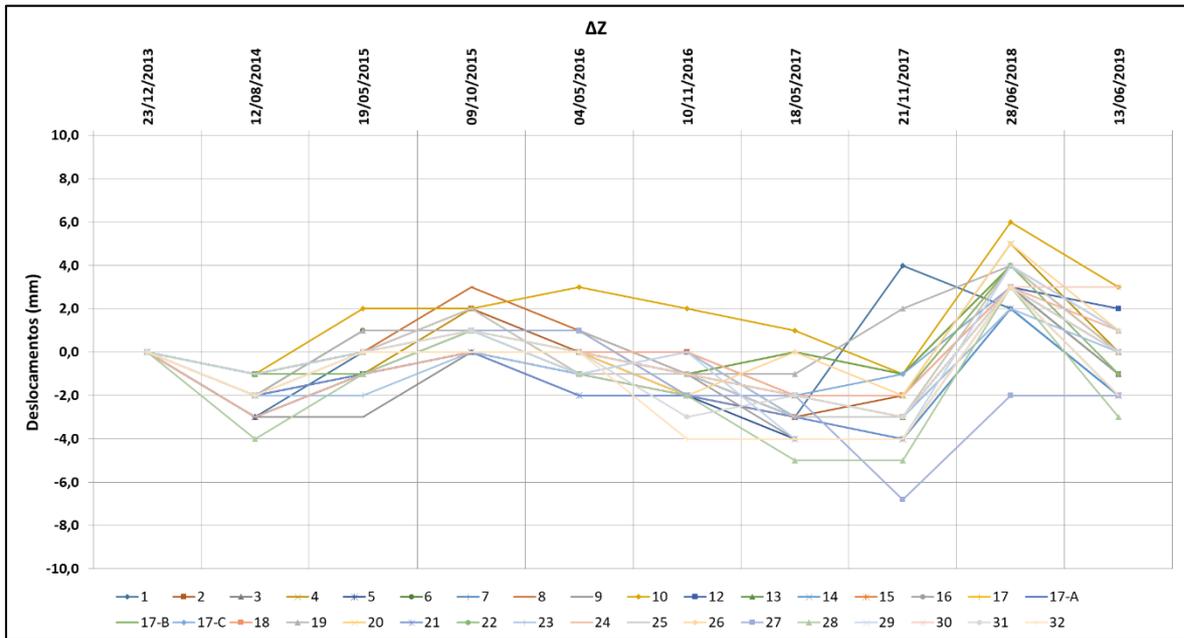


Gráfico 3. Leituras de alvos topográficos na direção Z

O acompanhamento da evolução da carga nas ancoragens é realizado com recurso a células de carga do tipo hidráulicas, sendo estas dotadas de orifício central, placa de distribuição integrada e manómetros para leitura direta. Tendo em conta que as estruturas apresentam um carácter definitivo, foram aplicadas caixas de proteção metálicas em cada uma das células. A aplicação destes dispositivos foi efetuada no decorrer do tensionamento das ancoragens, sendo as leituras realizadas através do dispositivo manométrico, por leitura direta. A Figura 35 apresenta as células de carga implementados no grupo de Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I.

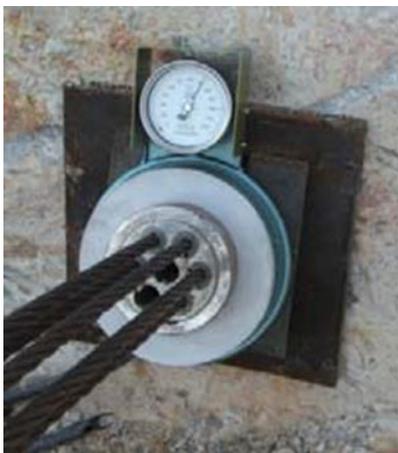


Figura 35. Células de Carga Manométricas (adaptado de Relatório de Instrumentação, 2017)

De seguida será apresentado um exemplo de um gráfico que foi desenvolvido com o objetivo de representar as leituras realizadas por células de carga, permitindo assim facilitar a interpretação dos dados fornecidos e o tratamento das leituras realizadas. O gráfico apresenta no eixo horizontal as datas onde ocorreram as leituras dos instrumentos e no eixo vertical a variação da carga que foi observada nas células de carga, sendo que cada linha representa uma célula de carga diferente.

O Gráfico 4 apresenta as leituras realizadas e o seu tratamento para as células de carga instaladas numa determinada estrutura.

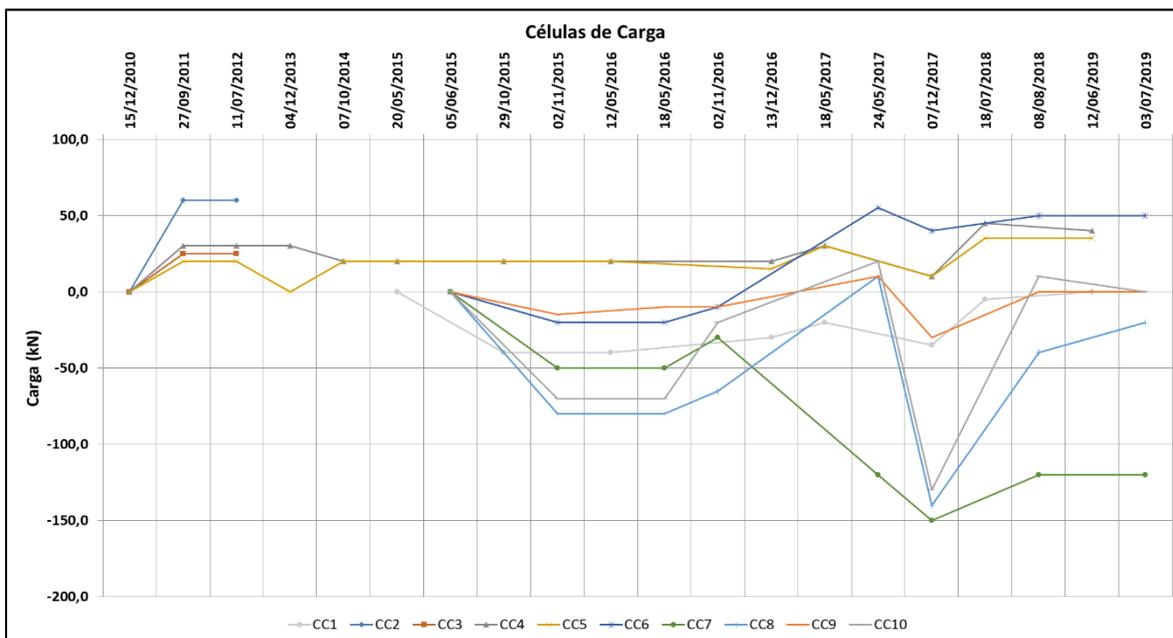


Gráfico 4. Leituras de células de carga

Para a leitura das deformações horizontais das calhas inclinométricas, pertencentes aos inclinómetros, é utilizado um equipamento digital composto por 3 elementos principais, o torpedo ou sonda inclinométrica, um cabo marcado com os intervalos de leitura e a unidade de leitura.

A sonda inclinométrica é dotada de dois pares de rodas e contém dois acelerómetros do tipo MEMS que efetuam medições em planos ortogonais. Os sensores inclinométricos são dispostos em direções ortogonais que medem a inclinação do eixo do tubo inclinométrico em relação à vertical.

As leituras são executadas do ponto mais baixo do tubo e sequencialmente para cima. A soma de cada leitura periódica fornece um perfil de deslocamento horizontal em função da profundidade. A comparação dos perfis sucessivos indica, para cada ponto de leitura, a direção e a magnitude do movimento.

A Figura 36 apresenta o equipamento de leitura de inclinômetros.



Figura 36. Equipamento de leitura de inclinômetro (retirado de Relatório de Instrumentação, 2017)

De seguida, será apresentado um exemplo de um conjunto de gráficos que foram desenvolvidos com o objetivo de representar as leituras realizadas por inclinômetros, permitindo assim facilitar a interpretação dos dados fornecidos e o tratamento das leituras realizadas. Os gráficos apresentam no eixo horizontal os deslocamentos horizontais observados e no eixo vertical a profundidade a que estes foram observados, sendo que cada linha representa uma data de leitura diferente. O Gráfico 5 apresenta as leituras realizadas e seu tratamento para inclinômetros instalados numa determinada estrutura.

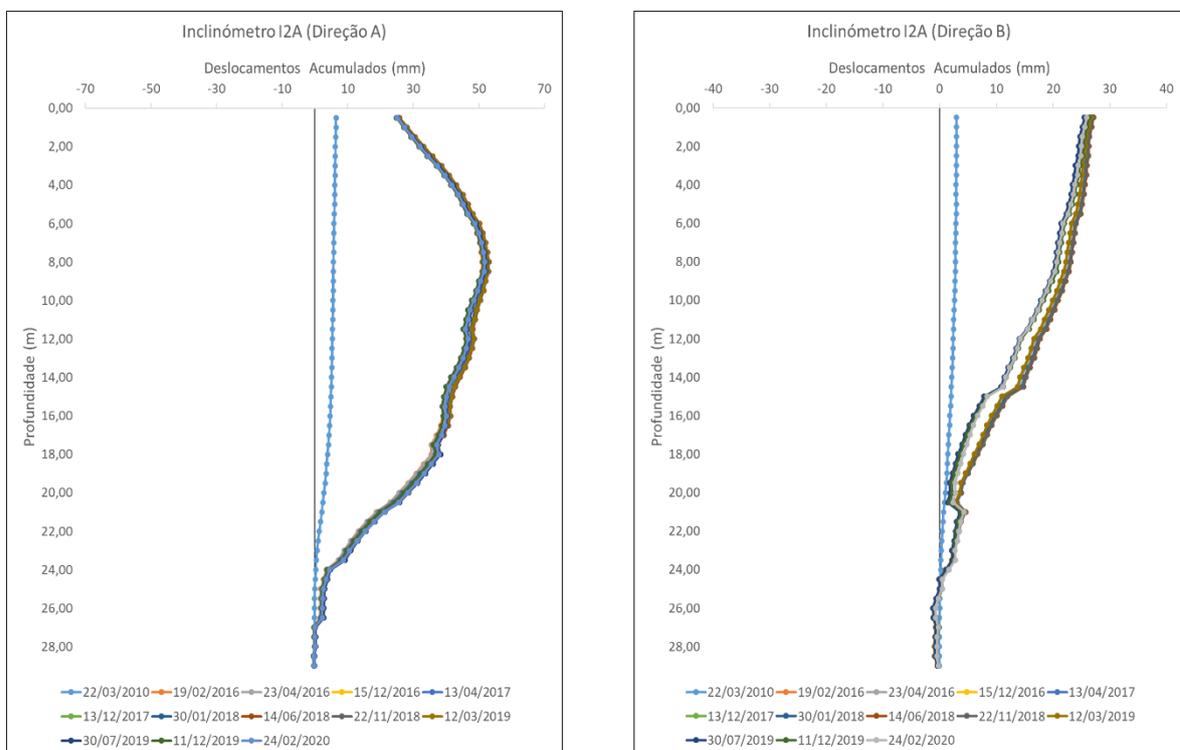


Gráfico 5. Leituras de inclinômetros

---

Em todos os gráficos apresentados anteriormente serão aplicados os critérios de alerta e de alarme propostos no capítulo seguinte, para muros e taludes que não apresentam um Plano de Instrumentação e Observação detalhado, definido em fase de projeto. Em estruturas em que o Plano de Instrumentação e Observação tenha sido elaborado em fase de projeto, serão esses os critérios definidos a seguir. Desta forma, será possível avaliar o comportamento da estrutura durante toda a sua fase de exploração.

Para além dos deslocamentos horizontais, nos inclinómetros, é efetuada a leitura da profundidade da água no interior das calhas inclinométricas. Para a leitura é utilizada uma sonda que, em contacto com a superfície da água emite um sinal sonoro, e o cabo encontra-se graduado.

A Figura 37 apresenta a sonda de leitura de piezómetros.



Figura 37. Sonda de leitura de piezómetros (retirado de Relatório de Instrumentação, 2017)

Relativamente aos piezómetros, estes encontram-se instalados em menores quantidades, sendo estes piezómetros hidráulicos de tubo aberto, simples e duplo. Os piezómetros simples apresentam apenas uma câmara piezométrica ao longo do comprimento do furo, enquanto que os piezómetros duplos apresentam duas câmaras piezométricas. Para a realização das leituras é utilizada a mesma sonda apresentada na Figura 36.

De seguida, será apresentado um exemplo de um gráfico que foi desenvolvido com o objetivo de representar as leituras realizadas por inclinómetros, permitindo assim facilitar a interpretação dos dados fornecidos e o tratamento das leituras realizadas.

O gráfico apresenta, no eixo horizontal, as datas em que ocorreram as leituras dos instrumentos e no eixo vertical, a profundidade a que se encontrava o nível piezométrico, sendo que cada linha representa um piezómetro.

O Gráfico 6 apresenta as leituras realizadas e o seu tratamento para os piezômetros instalados numa determinada estrutura.

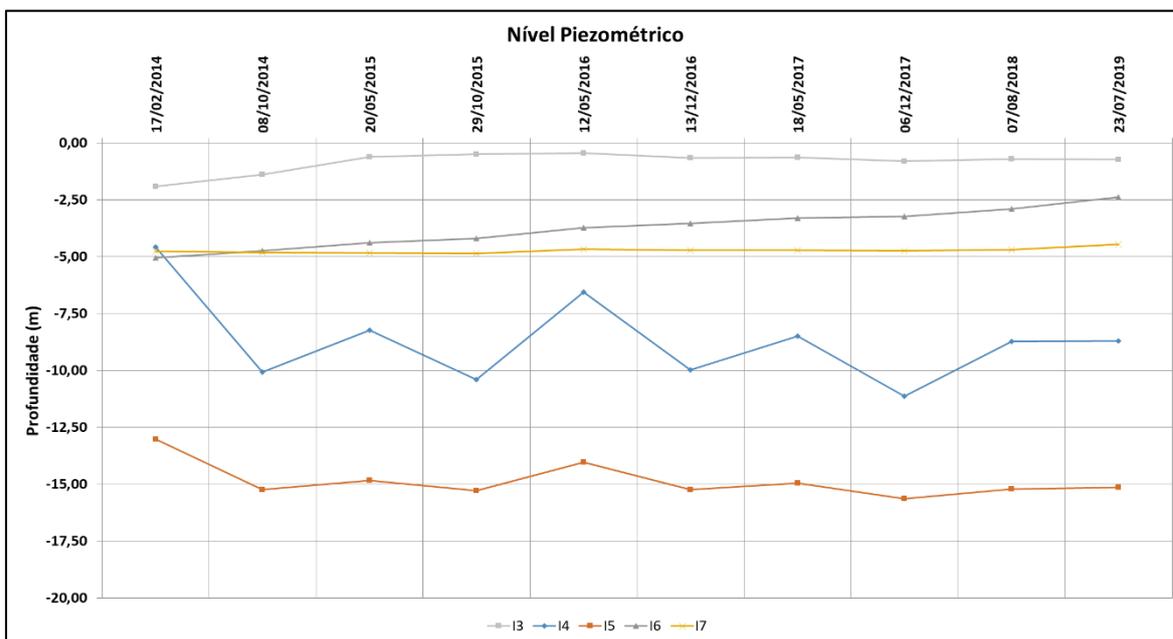


Gráfico 6. Leitura de piezômetros

Para além dos equipamentos mencionados anteriormente, podem vir a ser instalados outros tipos de equipamentos, aplicados em muros ou em taludes já existentes, caso seja observada a necessidade de estes serem instalados, ou em novas estruturas que sejam construídas, caso também seja observada a sua necessidade.

É também esperado que, com o avanço tecnológico aplicado aos instrumentos de monitorização e aos equipamentos de aquisição e transmissão de dados, que futuros equipamentos poderão apresentar sistemas de aquisição e transmissão de dados automáticos, sem ser necessário a leitura dos equipamentos e o seu processamento de forma manual.

---

## **Capítulo IV**

### **Níveis de Alerta e de Alarme na Fase de Exploração de Muros e Taludes**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

#### **4. Níveis de Alerta e de Alarme na Fase de Exploração de Muros e Taludes**

No presente capítulo serão apresentados níveis de alerta e de alarme gerais, definidos e avaliados ao longo do estágio realizado na Ascendi I.G.I., com o objetivo da avaliação da sua aplicabilidade a muros e taludes com equipamentos de monitorização instalados, mas que, no entanto, não apresentam um plano de monitorização detalhado, elaborado durante a fase de projeto pelo projetista. Nestes planos não se encontram definidos os níveis de alerta e de alarme a considerar na observação e auscultação da estrutura geotécnica durante o período de exploração.

O projeto de uma estrutura geotécnica deverá conter um plano de observação e auscultação destinado à fase de exploração da estrutura, com o objetivo de o dono de obra continuar a desenvolver campanhas de monitorização e inspeção, tendo por base esse documento. Este plano deve ser desenvolvido pelo projetista da estrutura, na elaboração do projeto.

Na norma portuguesa, NP EN 1997-1: 2010 – Eurocódigo 7 – Projeto geotécnicos – Parte 1: Regras gerais, no seu capítulo 4 – Supervisão da construção, observação e manutenção, são apresentados um conjunto de princípios e de regras a propósito dos trabalhos de observação e manutenção que devem ser executados durante a fase de exploração das estruturas.

No respetivo plano de observação e auscultação deverá ser descrito o projeto e os motivos pelos quais foram instalados os equipamentos de monitorização, referidas as alterações efetuadas ao projeto durante a fase de obras que possam ser relevantes e descritos os instrumentos de monitorização instalados e a sua respetiva localização em planta.

Para além desta informação, também deverão ser estipulados os valores de alerta e de alarme para os instrumentos instalados na estrutura, possibilitando assim ao dono de obra avaliar o comportamento da estrutura durante a fase de exploração da mesma. Em conjunto com os valores de alerta e de alarme, deverão também ser apresentadas sugestões de ações que possam ser implementadas caso os valores definidos sejam ultrapassados.

Os limites de alerta são valores ou taxas de variação que, de acordo com os cenários que fundamentaram a sua definição, podem indicar a ocorrência de situações suscetíveis de afetar a funcionalidade da própria estrutura e das estruturas localizadas na sua zona de influência, a curto prazo, podendo evoluir de modo a pôr em causa a respetiva segurança, com riscos para pessoas e bens. Este alerta deve começar por ser um alerta técnico, ou seja, exclusivamente indicado para os responsáveis pela análise dos resultados e pela interpretação do comportamento da estrutura que, depois de uma avaliação da situação, devem decidir sobre as medidas a adotar.

---

Os limites de alarme são valores ou taxas de variação que implicam uma ação imediata decidida no âmbito das ações de contingência (reforço das condições de segurança, evacuação da zona de risco, entre outras), independentemente da avaliação da situação. Sendo que estes valores ou taxas são, obviamente, superiores aos definidos para os limites alerta.

Estes níveis são utilizados para o controlo das estruturas, geralmente apresentam diferentes cores e significados previamente determinados. Estes valores são comparados com os resultados obtidos das leituras dos instrumentos e dessa comparação são retiradas conclusões acerca do comportamento e do estado da estrutura.

Leituras que se encontrem abaixo dos níveis de alerta significam que a estrutura não apresenta um comportamento preocupante, por esse motivo não será necessário atuar sobre a estrutura. Caso os valores lidos nos instrumentos de monitorização instalados na estrutura ultrapassem os níveis de alerta é necessário ter um maior cuidado com aquela estrutura em particular, uma vez que, se o seu comportamento continuar a evoluir no mesmo sentido, esta poderá entrar em rotura. Nesta fase, geralmente são aumentadas as frequências de leitura dos equipamentos instalados e realizadas algumas medidas cautelares. Para valores superiores aos níveis de alarme, a estrutura poderá entrar em rotura e, por esse motivo, é fundamental a realização de ações com o objetivo de restabelecer a segurança da mesma.

A definição dos níveis de alerta e de alarme, bem como as medidas a serem aplicadas caso estes valores sejam ultrapassados, exigem uma análise de risco e devem ser definidas pelo projetista da obra, por ser a entidade que melhor conhecimento tem da estrutura. Estes valores devem ser definidos tendo em conta as características individuais de cada projeto, como por exemplo:

- Tipo de estrutura desenvolvida e as suas características (materiais utilizados, características geométricas, revestimento superficial, entre outras);
- Características do maciço a suportar;
- Localização geográfica e características climáticas;
- Solicitações a que a estrutura se encontra sujeita;
- Envolvente da estrutura (existência de construções vizinhas, a circulação de trânsito, entre outras);

---

Ao longo do grupo de Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I., existem algumas infraestruturas geotécnicas com instrumentos de monitorização instalados que não apresentam um Plano de Instrumentação e Observação detalhado.

A ausência de critérios de alerta e de alarme para essas estruturas, que possibilitem a interpretação dos resultados das campanhas de leitura dos instrumentos de monitorização instalados, dificultam uma avaliação correta do estado de funcionalidade e de segurança das infraestruturas como muros e taludes.

É de destacar que, ao longo desta grande rede de estradas que se estende desde o Norte até ao Centro de Portugal, tanto no litoral como no interior do país, existem diversos tipos de estruturas que apresentam características distintas entre si, uma grande diversidade de características geológicas e geotécnicas dos terrenos por onde os traçados das estradas se desenvolvem, diferentes características hidrogeológicas e as estruturas encontram-se sujeitas a diferentes ações e agentes erosivos, dependendo da sua localização. Como exemplo, diferentes amplitudes térmicas, efeitos gelo-degelo no interior, ações do vento no litoral e em zonas de elevada altitude, precipitações elevadas observadas em algumas zonas, entre outras ações.

Esta diversidade de fatores e condições conferem, para além da grande experiência que a Ascendi I.G.I. apresenta na observação e auscultação de muros e taludes, uma maior aptidão para estudo e definição de critérios de alerta e de alarme gerais para muros e taludes.

É de salientar que os níveis de alerta e de alarme aqui estudados e definidos, apenas serão aplicados a muros e taludes que não apresentem um Plano de Instrumentação e Observação, ou não apresentem níveis de alerta e de alarme definidos para a fase de exploração da estrutura. Em muros e taludes que já apresentam um Plano de Instrumentação e Observação, serão aplicados os critérios definidos pelos mesmos.

Estes valores de alerta e de alarme foram desenvolvidos para colmatar uma lacuna, face à ausência dum plano de instrumentação e observação para o período de exploração, presente em alguns muros e taludes que se encontram nas Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I., aproveitando desta forma a experiência dos técnicos da Ascendi I.G.I. e dos seus consultores, que é resultado de 20 anos de operação e manutenção numa vasta rede de autoestradas.

Atualmente, nos projetos desenvolvidos pela Ascendi I.G.I. já é obrigatório a elaboração dum plano, com a definição, durante a fase de projeto, pelo projetista responsável, dos valores de alerta e de alarme, quer para a fase de construção/reforço e de exploração da estrutura – muro ou talude.

---

Numa fase inicial do estudo dos níveis de alerta e de alarme foram definidos os diferentes tipos de infraestruturas presentes ao longo do grupo de Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I. para as quais seria necessário definir estes níveis. Dessa avaliação surgiram as seguintes tipologias de muros e taludes:

- Taludes de Escavação;
- Taludes de Aterro;
- Muros Ancorados;
- Muros de Betão Armado;
- Muros de Terra Armada;
- Muros de Gabiões.

Os valores aqui apresentados para as diferentes tipologias de estruturas, surgiram numa primeira fase de uma pesquisa bibliográfica de documentos que se debruçassem sobre o assunto, onde se destacam as seguintes publicações: Sabatini et al. (1997), Ortigão et al. (2001), Costa (2005), Intrieri et al. (2012) e Lienhart et al. (2018), Chen & Jiang (2020), entre outras.

Para além da pesquisa bibliográfica realizada, os níveis de alerta e de alarme aqui apresentados são resultado do trabalho em conjunto da Ascendi I.G.I com dois especialistas na área, o Sr. Engenheiro Eduardo Mira Fernandes e o Sr. Engenheiro Alexandre Pinto, que desempenharam um papel fundamental na análise, estudo e definição dos níveis de alerta e de alarme genéricos aqui propostos.

#### ***4.1. Critérios para a Definição de Níveis de Alerta e de Alarme para Taludes***

De seguida serão apresentados os critérios propostos para os níveis de alerta e de alarme para Taludes, sendo que estes resultam, como já referido, da pesquisa bibliográfica e da experiência conjunta de todos os elementos envolvidos. Da pesquisa bibliográfica realizada destacam-se as seguintes publicações referentes a taludes: Slob et al. (2007) e Intrieri et al. (2012).

No Quadro 5 são apresentados os níveis de alerta e de alarme propostos para Taludes de Aterro e o conjunto de ações que devem ser realizadas caso algum destes critérios seja ultrapassado.

Quadro 5. Níveis de alerta e de alarme propostos para Taludes de Aterro

Nível	Critérios para Taludes de Aterro			
	Top./Inclin.	Fissuras/Cicatrizes	Taxas de deformação	Ações
1 (Estável)	$\delta_H < 40 \text{ mm}$ $\delta_V < 15 \text{ mm}$	$\Delta_{mm} < 40 \text{ mm}$	$\Delta\delta_H < 1.5 \text{ mm/dia}$ $\Delta\delta_V < 0.5 \text{ mm/dia}$	Estável.
2 (Alerta)	$80 \text{ mm} > \delta_H > 40 \text{ mm}$ $30 \text{ mm} > \delta_V > 15 \text{ mm}$	$80 \text{ mm} > \Delta_{mm} > 40 \text{ mm}$	$3.0 \text{ mm/dia} > \Delta\delta_H > 1.5 \text{ mm/dia}$ $1.0 \text{ mm/dia} > \Delta\delta_V > 0.5 \text{ mm/dia}$	Comunicação às entidades envolvidas, acompanhamento especial, verificação de leituras, elaboração de plano de ação.
3 (Alarme)	$\delta_H > 80 \text{ mm}$ $\delta_V > 30 \text{ mm}$	$\Delta_{mm} > 80 \text{ mm}$	$\Delta\delta_H > 3.0 \text{ mm/dia}$ $\Delta\delta_V > 1.0 \text{ mm/dia}$	Comunicação às entidades envolvidas, verificação de leituras, aumento da frequência de leituras e aplicação de medidas de reposição de segurança.

Como é possível observar no quadro anterior, os níveis de alerta e de alarme propostos para Taludes de Aterro encontram-se definidos em três critérios distintos. O primeiro critério apresentado refere-se aos deslocamentos horizontais e verticais em milímetros ( $\delta_H$  e  $\delta_V$ , respetivamente) que o talude experimenta durante a sua fase de exploração, e que são considerados indicadores de que o talude poderá estar a apresentar um comportamento anormal e, em última análise, poderá estar a entrar em rotura, caso estes critérios sejam ultrapassados. Estes critérios serão aplicados às leituras realizadas através de alvos topográficos ou inclinómetros que se encontrem instalados em Taludes de Aterro.

O segundo critério refere-se à existência de fissuras na superfície do talude ou nos seus elementos, que podem ser observadas através de fissurómetros. Fissuras representam sempre um ponto de fraqueza que indicia rotura, por esse motivo a sua observação é de grande importância.

O terceiro critério apresentado refere-se às taxas de deformações horizontais e verticais em milímetros por dia ( $\Delta\delta_H$  e  $\Delta\delta_V$ , respetivamente); este critério permite observar e controlar com que velocidade o talude se deforma e, desta forma, avaliar a probabilidade de este sofrer um deslizamento.

No Quadro 6 são apresentados os níveis de alerta e de alarme propostos para Taludes de Escavação e o conjunto de ações que devem ser realizadas caso algum destes critérios seja ultrapassado.

Quadro 6. Níveis de alerta e de alarme propostos para Taludes de Escavação

Nível	Critérios para Taludes de Escavação			
	Top./Inclin.	Fissuras	Taxas de deformação	Ações
1 (Estável)	$\delta_H < 30 \text{ mm}$ $\delta_V < 10 \text{ mm}$	$\Delta_{mm} < 30 \text{ mm}$	$\Delta\delta_H < 1.5 \text{ mm/dia}$ $\Delta\delta_V < 0.5 \text{ mm/dia}$	Estável.
2 (Alerta)	$60 \text{ mm} > \delta_H > 30 \text{ mm}$ $20 \text{ mm} > \delta_V > 10 \text{ mm}$	$60 \text{ mm} > \Delta_{mm} > 30 \text{ mm}$	$3.0 \text{ mm/dia} > \Delta\delta_H > 1.5 \text{ mm/dia}$ $1.0 \text{ mm/dia} > \Delta\delta_V > 0.5 \text{ mm/dia}$	Comunicação às entidades envolvidas, acompanhamento especial, verificação de leituras, elaboração de plano de ação.
3 (Alarme)	$\delta_H > 60 \text{ mm}$ $\delta_V > 20 \text{ mm}$	$\Delta_{mm} > 60 \text{ mm}$	$\Delta\delta_H > 3.0 \text{ mm/dia}$ $\Delta\delta_V > 1.0 \text{ mm/dia}$	Comunicação às entidades envolvidas, verificação de leituras, aumento da frequência de leituras e aplicação de medidas de reposição de segurança.

Como é possível observar no quadro anterior, os níveis de alerta e de alarme propostos para Taludes de Escavação encontram-se definidos em três critérios distintos.

O primeiro critério apresentado refere-se aos deslocamentos horizontais e verticais em milímetros ( $\delta_H$  e  $\delta_V$ , respetivamente) que o talude experimenta durante a sua fase de exploração, e que são considerados indicadores de que o talude poderá estar a apresentar um comportamento anormal e, em última análise, poderá estar a entrar em rotura, caso estes critérios sejam ultrapassados. Estes critérios serão aplicados às leituras realizadas através de alvos topográficos ou inclinómetros que se encontrem instalados em Taludes de Escavação.

O segundo critério refere-se à existência de fissuras na superfície do talude ou nos seus elementos, que podem ser observadas através de fissurómetros.

O terceiro critério apresentado refere-se às taxas de deformações horizontais e verticais em milímetros por dia ( $\Delta\delta_H$  e  $\Delta\delta_V$ , respetivamente).

---

Estes critérios de alerta e alarme foram definidos tendo em conta as características e o tipo de comportamento que é esperado em taludes de aterro e em taludes de escavação durante a sua fase de exploração.

Estes critérios serão aplicados a taludes sempre que o projeto não contemple um plano específico para os mesmos.

No caso de taludes de escavação e/ou aterro e tendo por base a elevada velocidade da maioria dos deslizamentos, as deformações dos mesmos devem ser avaliadas por mapeamento geométrico da face dos taludes, com recurso, por exemplo, à tecnologia de varrimento laser (Slob et al., 2007). Em situações menos complexas, os taludes poderão ser monitorizados com recurso a alvos topográficos.

É de salientar que alguns taludes, onde foram aplicados estes critérios de alerta e de alarme, já apresentavam um Plano de Instrumentação e Observação.

Da comparação entre os critérios de alerta e de alarme propostos e os definidos pelos projetos, observou-se que os critérios propostos eram mais conservativos que os definidos em projeto. Desta forma, é possível concluir que os critérios propostos vão permitir antecipar a deteção de comportamentos instabilizadores dos taludes, atuando assim pela segurança.

Os gráficos seguintes apresentam os critérios de alerta e de alarme horizontais e verticais propostos individualmente para cada tipologia de talude e a média dos deslocamentos horizontais e verticais observados por alvos topográficos para as estruturas em questão.

Com estes gráficos pretende-se ter uma visão geral do nível em que cada estrutura se encontra, realçando-se que, para uma avaliação mais ao pormenor, é fundamental recorrer às fichas de monitorização desenvolvidas individualmente para cada estrutura.

Nas fichas de monitorização individuais, os critérios de alerta e de alarme aqui propostos encontram-se aplicados a todas as leituras realizadas pelo conjunto de equipamentos de monitorização instalados nas respetivas estruturas, desta forma é possível conhecer ao pormenor o tipo de comportamento que a estrutura está a apresentar.

O Gráfico 7 apresenta os níveis de alerta e de alarme correspondentes a deslocamentos horizontais propostos para Taludes de Aterro em função da altura do talude.

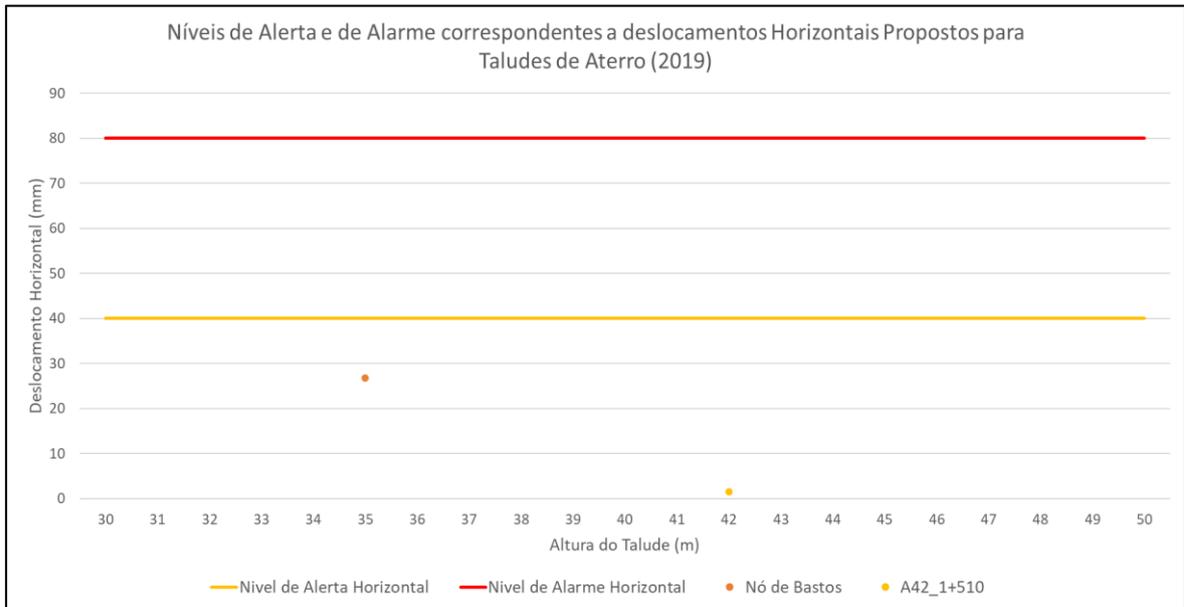


Gráfico 7. Níveis de alerta e de alarme correspondentes a deslocamentos horizontais propostos para Taludes de Aterro

O Gráfico 8 apresenta os níveis de alerta e de alarme correspondentes a deslocamentos verticais propostos para Taludes de Aterro em função da altura do talude.

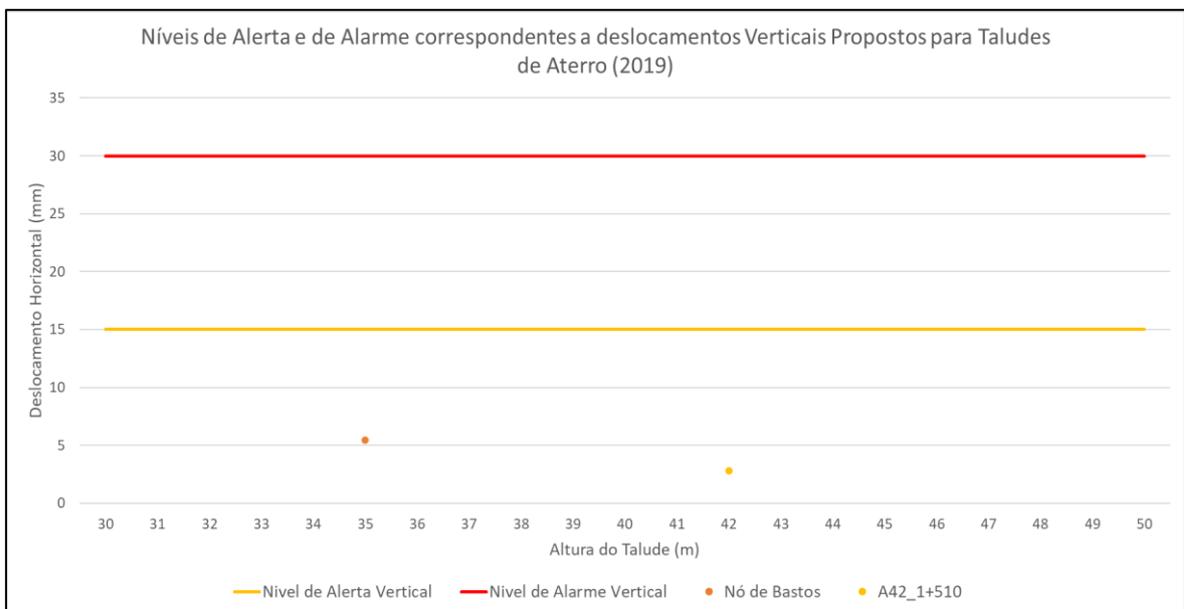


Gráfico 8. Níveis de alerta e de alarme correspondentes a deslocamentos verticais propostos para Taludes de Aterro

O Gráfico 9 apresenta os níveis de alerta e de alarme correspondentes a deslocamentos horizontais propostos para Taludes de Escavação em função da altura do talude.

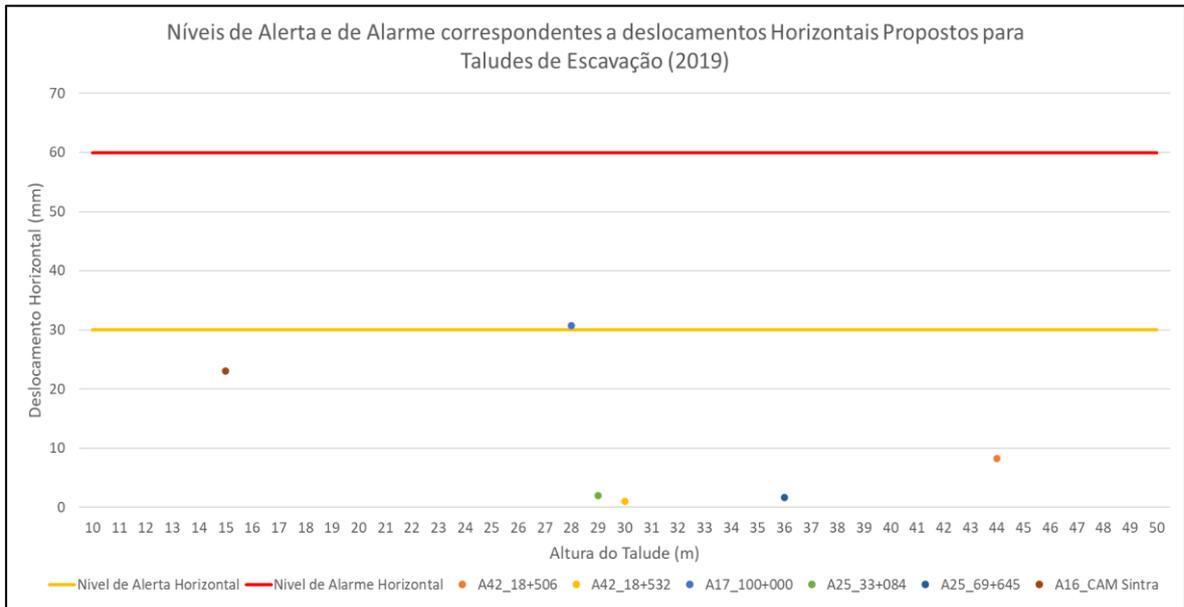


Gráfico 9. Níveis de alerta e de alarme correspondentes a deslocamentos horizontais propostos para Taludes de Escavação

O Gráfico 10 apresenta os níveis de alerta e de alarme correspondentes a deslocamentos verticais propostos para Taludes de Escavação em função da altura do talude.

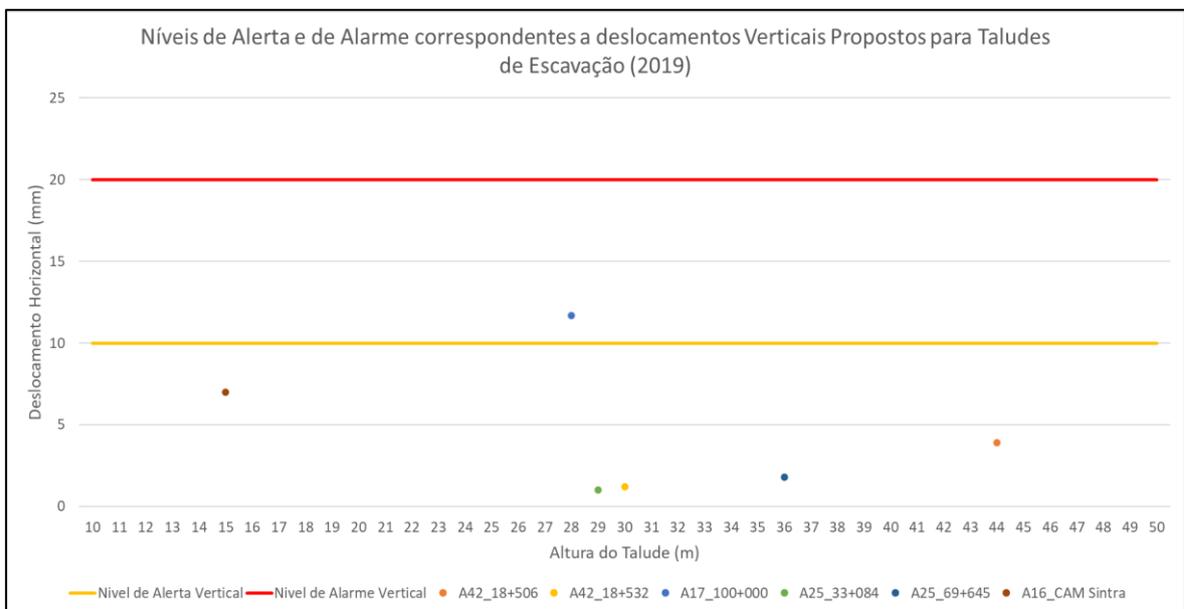


Gráfico 10. Níveis de alerta e de alarme correspondentes a deslocamentos verticais propostos para Taludes de Escavação

#### 4.2. Critérios para o Cálculo de Níveis de Alerta e de Alarme de Muros de Contenção

De seguida, serão apresentadas os critérios base para o cálculo dos níveis de alerta e de alarme para Muros; estas foram utilizadas como ponto de partida para o estudo realizado, sendo que os critérios base resultam da pesquisa bibliográfica e da experiência conjunta de todos os elementos da equipa envolvidos.

No Quadro 7 são apresentados os níveis de alerta e de alarme base para Muros Ancorados e o conjunto de ações que devem ser realizadas caso algum destes critérios seja ultrapassado.

Quadro 7. Níveis de Alerta e de Alarme Base para Muros Ancorados

Nível	Critérios Base para Muros Ancorados		
	Topografia/Inclinómetros	Células de carga	Ação
1 (Estável)	$\delta_H < H/500$ $\delta_V < H/1000$	$\Delta P < \pm 15\%$	Estável.
2 (Alerta)	$H/250 > \delta_H > H/500$ $H/500 > \delta_V > H/1000$	$\pm 30\% > \Delta P > \pm 15\%$	Comunicação às entidades envolvidas, acompanhamento especial, verificação de leituras, elaboração de plano de ação.
3 (Alarme)	$\delta_H > H/250$ $\delta_V > H/500$	$\Delta P > \pm 30\%$	Comunicação às entidades envolvidas, verificação de leituras, aumento da frequência de leituras e aplicação de medidas de reposição de segurança.

Como é possível observar no quadro anterior, os níveis de alerta e alarme base para Muros Ancorados encontra-se dividida em dois critérios distintos. Estes critérios tiveram como base o documento realizado por Lienhart et al. (2018).

Os primeiros critérios apresentados referem-se aos deslocamentos horizontais e verticais nas unidades de H ( $\delta_H$  e  $\delta_V$ , respetivamente) que o muro experimenta durante a sua fase de exploração, e que são considerados indicadores de que o muro poderá estar a apresentar um comportamento anormal e, em última análise, poderá estar a entrar em rotura, caso estes critérios sejam ultrapassados. O cálculo dos níveis de alerta e de alarme para os deslocamentos horizontais e verticais encontram-se dependentes de um fator H, que corresponde à altura do muro. Estes critérios serão aplicados às leituras realizadas através de alvos topográficos ou inclinómetros que se encontrem instalados em Muros Ancorados.

O segundo critério considerado para muros ancorados é a variação de carga das ancoragens definitivas ( $\Delta P$ ), em percentagem. Caso os valores de variação de carga das ancoragens ultrapassem determinados limites, tanto por acréscimo como por perda de carga, pode ser indicador de um comportamento anormal por parte da estrutura. Estes critérios serão aplicados às leituras realizadas por células de carga que se encontrem instaladas em muros ancorados.

No Quadro 8 são apresentados os níveis de alerta e de alarme base para Muros de Betão Armado e o conjunto de ações que devem ser realizadas caso algum destes critérios seja ultrapassado.

Quadro 8. Níveis de Alerta e de Alarme Base para Muros de Betão Armado

Nível	Critérios Base para Muros de Betão Armado	
	Topografia/Inclinómetros	Ação
1 (Estável)	$\delta_H < H/200$ $\delta_V < H/500$	Estável.
2 (Alerta)	$H/100 > \delta_H > H/200$ $H/333 > \delta_V > H/500$	Comunicação às entidades envolvidas, acompanhamento especial, verificação de leituras, elaboração de plano de ação.
3 (Alarme)	$\delta_H > H/100$ $\delta_V > H/333$	Comunicação às entidades envolvidas, verificação de leituras, aumento da frequência de leituras e aplicação de medidas de reposição de segurança.

Como é possível observar no quadro anterior, os níveis de alerta e de alarme base para Muros de Betão Armado encontram-se definidos apenas num critério; estes critérios tiveram como base o documento redigido por Sabatini et al. (1997).

O critério apresentado refere-se aos deslocamentos horizontais e verticais nas unidades de H ( $\delta_H$  e  $\delta_V$ , respetivamente) que o muro experimenta durante a sua fase de exploração, e que são considerados indicadores de que o muro poderá estar a apresentar um comportamento anormal e, em última análise, poderá estar a entrar em rotura, caso estes critérios sejam ultrapassados. O cálculo dos níveis de alerta e de alarme para os deslocamentos horizontais e verticais encontram-se dependentes de um fator H, que corresponde à altura do muro. Estes critérios serão aplicados às leituras realizadas por alvos topográficos ou inclinómetros que se encontrem instalados em Muros de Betão Armado.

No Quadro 9 são apresentados os níveis de alerta e de alarme base para Muros de Terra Armada e o conjunto de ações que devem ser realizadas caso algum destes critérios seja ultrapassado.

Quadro 9. Níveis de Alerta e de Alarme Base para Muros de Terra Armada

Nível	Critérios Base para Muros de Terra Armada	
	Topografia/Inclinómetros	Ação
<b>1</b> <b>(Estável)</b>	$\delta_H < H/267$ $\delta_V < H/500$	Estável.
<b>2</b> <b>(Alerta)</b>	$H/150 > \delta_H > H/267$ $H/333 > \delta_V > H/500$	Comunicação às entidades envolvidas, acompanhamento especial, verificação de leituras, elaboração de plano de ação.
<b>3</b> <b>(Alarme)</b>	$\delta_H > H/150$ $\delta_V > H/333$	Comunicação às entidades envolvidas, verificação de leituras, aumento da frequência de leituras e aplicação de medidas de reposição de segurança.

Como é possível observar no quadro anterior, os níveis de alerta e de alarme base para Muros de Terra Armada encontram-se definidos apenas num critério.

O critério apresentado refere-se aos deslocamentos horizontais e verticais nas unidades de H ( $\delta_H$  e  $\delta_V$ , respetivamente) que o muro experimenta durante a sua fase de exploração, e que são considerados indicadores de que o muro poderá estar a apresentar um comportamento anormal e, em última análise, poderá estar a entrar em rotura, caso estes critérios sejam ultrapassados. O cálculo dos níveis de alerta e de alarme para os deslocamentos horizontais e verticais encontra-se dependente de um fator H, que corresponde à altura do muro. Estes critérios serão aplicados às leituras realizadas por alvos topográficos ou inclinómetros que se encontrem instalados em Muros de Terra Armada.

No Quadro 10 são apresentados os níveis de alerta e de alarme base para Muros de Gabiões e o conjunto de ações que devem ser realizadas caso algum destes critérios seja ultrapassado.

Quadro 10. Níveis de Alerta e de Alarme Base para Muros de Gabiões

Nível	Critérios Base para Muros de Gabiões	
	Topografia/Inclinómetros	Ação
1 (Estável)	$\delta_H < H/200$ $\delta_V < H/500$	Estável.
2 (Alerta)	$H/100 > \delta_H > H/200$ $H/333 > \delta_V > H/500$	Comunicação às entidades envolvidas, acompanhamento especial, verificação de leituras, elaboração de plano de ação.
3 (Alarme)	$\delta_H > H/100$ $\delta_V > H/333$	Comunicação às entidades envolvidas, verificação de leituras, aumento da frequência de leituras e aplicação de medidas de reposição de segurança.

Como é possível observar no quadro anterior, os níveis de alerta e de alarme base para Muros de Gabiões encontram-se definidos em apenas um único critério.

O critério apresentado refere-se aos deslocamentos horizontais e verticais nas unidades de H ( $\delta_H$  e  $\delta_V$ , respetivamente) que o muro experimenta durante a sua fase de exploração, e que são considerados indicadores de que o muro poderá estar a apresentar um comportamento anormal e, em última análise, poderá estar a entrar em rotura, caso estes critérios sejam ultrapassados. O cálculo dos níveis de alerta e de alarme para os deslocamentos horizontais e verticais encontra-se dependente de um fator H, que corresponde à altura do muro. Estes critérios serão aplicados às leituras realizados por alvos topográficos ou inclinómetros que se encontrem instalados em Muros de Gabiões.

Estes critérios foram definidos tendo em conta as características e o comportamento que é esperado para cada tipologia de muros.

Muros Ancorados são mais eficazes no controlo de deslocamentos que as restantes tipologias de muros aqui referidas, por esse motivo experimentam menores deslocamentos antes de atingirem uma situação que possa afetar a sua segurança. Por outro lado, Muros de Gabiões, devido às suas características, são uma tipologia de muro mais deformável, ou seja, estes muros podem experimentar maiores deslocamentos antes de atingirem uma situação que possa afetar a sua estabilidade.

Este conhecimento teórico encontra-se vertido nos critérios apresentados anteriormente, onde é possível observar que os critérios para a definição dos níveis de alerta e de alarme permitem obter maiores valores para Muros de Gabiões, seguindo-se os Muros de Terra Armada, os Muros de Betão Armado e, por fim, os Muros Ancorados.

Independentemente da tipologia de muro aqui referida, os valores obtidos para os níveis de alerta e de alarme aumentam em conformidade com o aumento de altura do muro (H), uma vez que muros da mesma tipologia que apresentem uma altura maior podem experimentar deslocamentos maiores, quando comparados com muros de menor altura.

Para possibilitar a melhor interpretação destes critérios de alerta e alarme base foram desenvolvidos os seguintes gráficos.

O Gráfico 11 apresenta os níveis de alerta correspondentes a deslocamentos horizontal base para as diferentes tipologias de muros e em função da altura do muro.

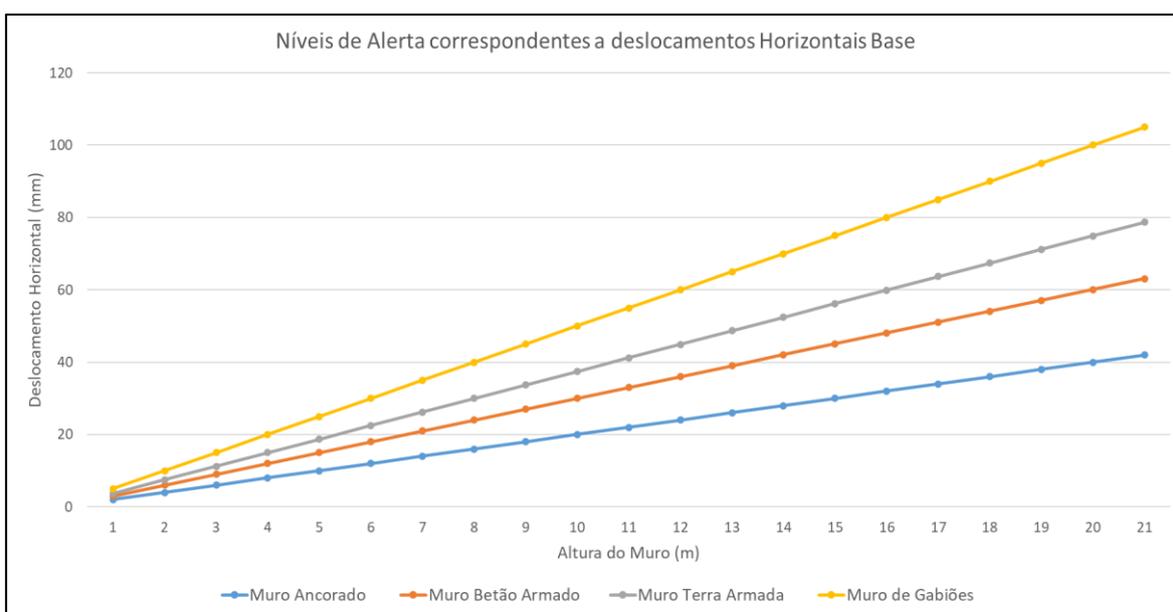


Gráfico 11. Níveis de alerta correspondentes a deslocamentos horizontal base

No gráfico anterior é possível observar como os valores dos níveis de alerta horizontais base vão aumentando conforme a altura do muro aumenta e a diferença que existe nos valores registados para as diferentes tipologias de muros.

O Gráfico 12 apresenta os níveis de alarme correspondentes a deslocamentos horizontal base para as diferentes tipologias de muros e em função da altura do muro.

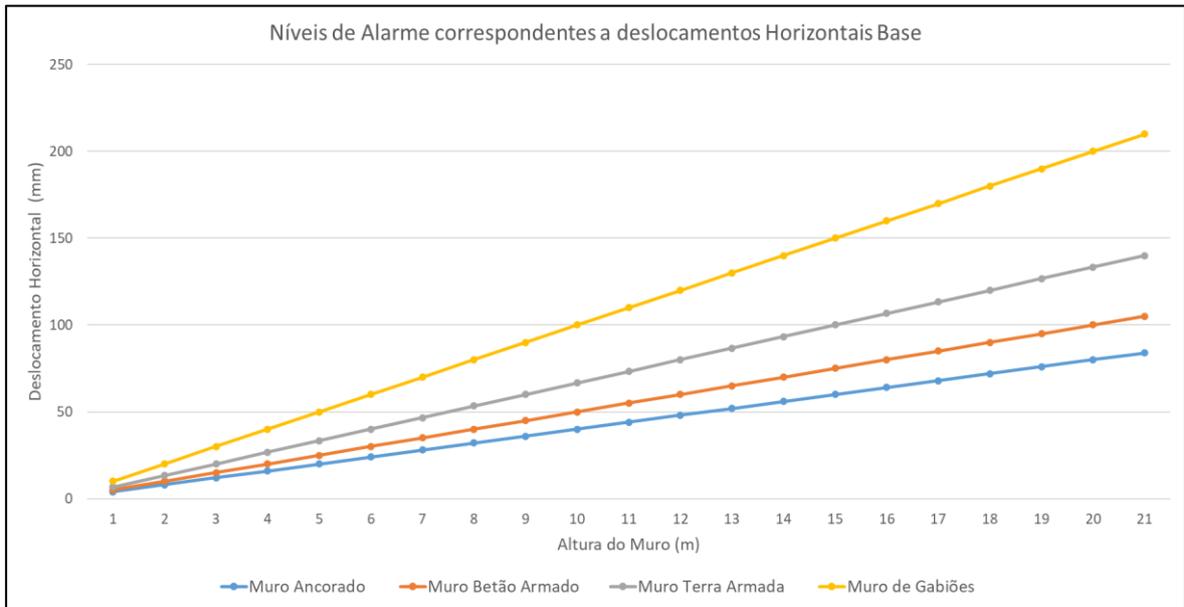


Gráfico 12. Níveis de alarme correspondentes a deslocamentos horizontal base

No gráfico anterior é possível observar como os valores dos níveis de alarme horizontais base vão aumentando conforme a altura do muro aumenta, e a diferença registada nos valores para as diferentes tipologias de muros.

O Gráfico 13 apresenta os níveis de alerta correspondentes a deslocamentos vertical base para as diferentes tipologias de muros e em função da altura do muro.

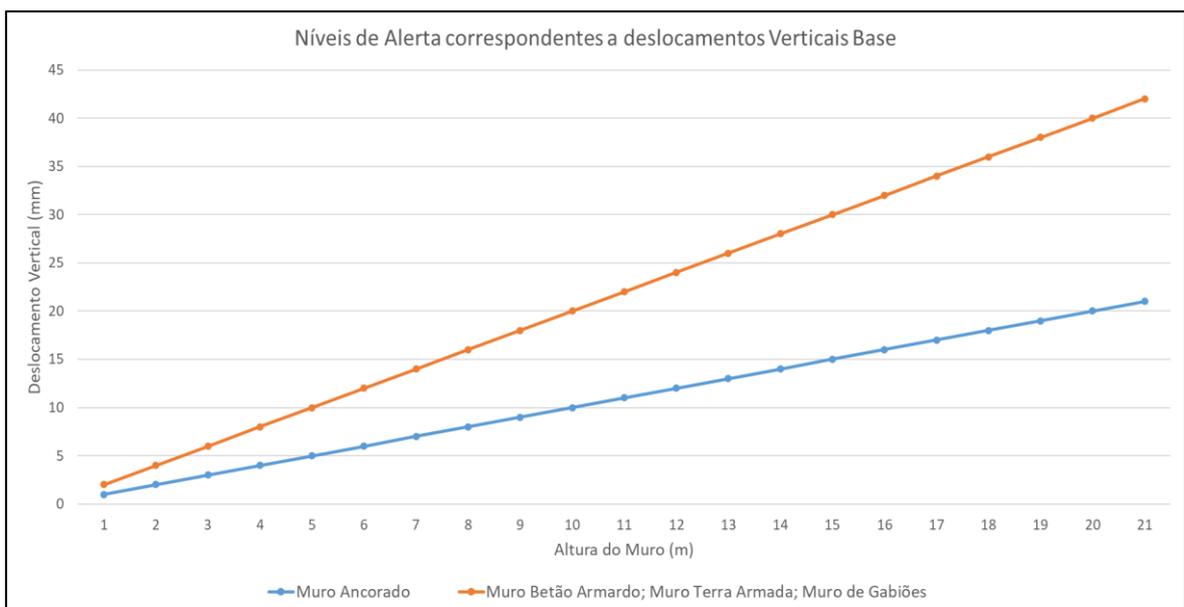


Gráfico 13. Níveis de alerta correspondentes a deslocamentos vertical base

No gráfico anterior é possível observar como os valores dos níveis de alerta verticais base vão aumentando conforme a altura do muro aumenta, e a diferença registada nos valores para as diferentes tipologias de muros. Neste gráfico, é apenas possível observar duas linhas referentes aos níveis de alerta correspondentes a deslocamentos verticais, pois o critério proposto para os Muros de Betão Armado, os Muros de Terra Armada e os Muros de Gabiões é o mesmo.

O Gráfico 14 apresenta os níveis de alarme correspondentes a deslocamentos vertical base para as diferentes tipologias de muros e em função da altura do muro.

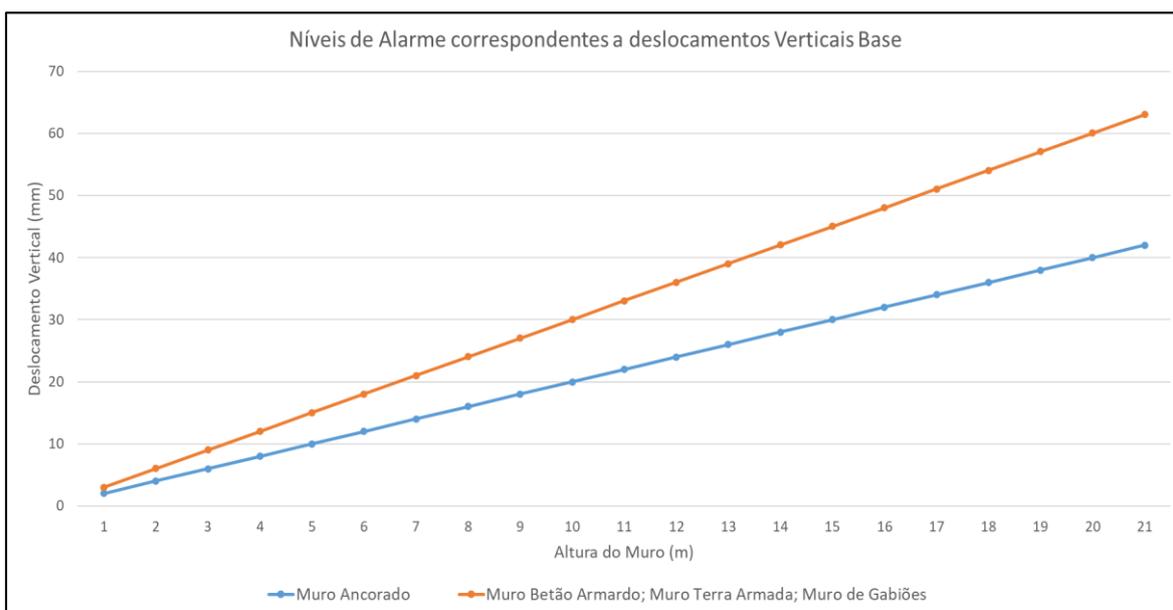


Gráfico 14. Níveis de alarme correspondentes a deslocamentos vertical base

No gráfico anterior é possível observar como os valores dos níveis de alarme verticais base vão aumentando conforme a altura do muro aumenta, e a diferença registada nos valores para as diferentes tipologias de muros. Neste gráfico, é apenas possível observar duas linhas referentes aos níveis de alarme correspondentes a deslocamentos verticais, pois o critério proposto para os Muros de Betão Armado, os Muros de Terra Armada e os Muros de Gabiões é o mesmo.

Comparando os diferentes gráficos é possível concluir que os valores de alarme são superiores aos valores de alerta. É também possível observar que os níveis de alerta e de alarme horizontais são superiores aos níveis de alerta e alarme verticais. Esta diferença de valores entre critérios de deslocamentos horizontais e verticais encontra-se relacionada com o facto de a ocorrência de deslocamentos verticais ser mais gravosa para a segurança e estabilidade do muro, quando comparados em termos de valor com os deslocamentos horizontais. Por este motivo, são definidos valores limite menores para os de deslocamentos verticais para a deteção mais rápida destes fenómenos de instabilidade, podendo-se assim atuar sobre o mesmo.

Com estes critérios de alerta e de alarme base definidos, seguiu-se a sua aplicação a todas as leituras obtidas de instrumentos de monitorização instalados em diversos muros do grupo de Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I. Estes critérios base foram aplicados mesmo a muros que apresentassem um Plano de Instrumentação e Observação, possibilitando assim a comparação dos níveis de alerta e de alarme obtidos a partir dos critérios acima apresentadas, com os definidos na fase de projeto.

Após serem aplicadas estes critérios a um conjunto de muros, observou-se que, para muros superiores a 10 m, os valores obtidos para os níveis de alerta e de alarme eram bastante elevados. O mesmo foi observado para os critérios estipulados para os Muros de Gabiões. Destas observações, decorreram um conjunto de ajustes nos critérios de alerta e de alarme base que possibilitaram a obtenção dos critérios de alerta e de alarme propostos.

De seguida, serão apresentadas os critérios propostos para o cálculo dos níveis de alerta e de alarme, sendo que estas têm por base os critérios apresentados anteriormente e resultam da análise dos casos onde os critérios base foram aplicadas e da experiência conjunta de todos os elementos envolvidos.

No Quadro 11 são apresentados os níveis de alerta e de alarme propostos para Muros Ancorados e o conjunto de ações que devem ser realizadas caso algum destes critérios seja ultrapassado.

Quadro 11. Níveis de alerta e de alarme propostos para Muros Ancorados

Nível	Critérios para Muros Ancorados			
	Topografia/Inclinómetros		Células de carga	Ações
	$H \leq 10$ m	$H > 10$ m		
1 (Estável)	$\delta_H < H/500$ $\delta_V < H/1000$	$\delta_H < \left(\frac{10}{500}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 500}\right)$ $\delta_V < \left(\frac{10}{1000}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 1000}\right)$	$\Delta P < \pm 20\%$	Estável.
2 (Alerta)	$H/250 > \delta_H > H/500$ $H/500 > \delta_V > H/1000$	$\left(\frac{10}{250}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 250}\right) > \delta_H > \left(\frac{10}{500}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 500}\right)$ $\left(\frac{10}{500}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 500}\right) > \delta_V > \left(\frac{10}{1000}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 1000}\right)$	$\pm 30\% > \Delta P > \pm 20\%$	Comunicação às entidades envolvidas, acompanhamento especial, verificação de leituras, elaboração de plano de ação.
3 (Alarme)	$\delta_H > H/250$ $\delta_V > H/500$	$\delta_H > \left(\frac{10}{250}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 250}\right)$ $\delta_V > \left(\frac{10}{500}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 500}\right)$	$\Delta P > \pm 30\%$	Comunicação às entidades envolvidas, verificação de leituras, aumento da frequência de leituras e aplicação de medidas de reposição de segurança.

Comparando os Quadros 7 e 11 é possível observar que a grande diferença entre os critérios base e os critérios propostos é a divisão dos Muros Ancorados em muros com altura inferior a 10 m e superior a 10 m. Com a criação de um novo critério para os muros com altura superior a 10 m foi possível resolver o problema detetado durante a aplicação dos critérios base.

O critério proposta para Muros Ancorados com mais de 10 m permite reduzir os valores obtidos para os níveis de alerta e de alarme de muros com uma altura superior aos 10 m, tendo como base o critério para muros inferiores a 10 m. Outra alteração realizada encontra-se relacionada com a mudança do nível de alerta para a variação de carga das ancoragens definitivas. Este valor foi ajustado de 15% para 20%, uma vez que se observou que 15% era demasiado reduzido e que poderia induzir a falsos alertas, não se traduzindo em nenhum benefício.

No Quadro 12 são apresentados os níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Betão Armado e o conjunto de ações que devem ser realizadas caso algum destes critérios seja ultrapassado.

Quadro 12. Níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Betão Armado

Nível	Critérios para Muros de Betão Armado		Ações
	Topografia/Inclinómetros		
	$H \leq 10$ m	$H > 10$ m	
1 (Estável)	$\delta_H < H/333$ $\delta_V < H/500$	$\delta_H < \left(\frac{10}{333}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 333}\right)$ $\delta_V < \left(\frac{10}{500}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 500}\right)$	Estável.
2 (Alerta)	$H/200 > \delta_H > H/333$ $H/333 > \delta_V > H/500$	$\left(\frac{10}{200}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 200}\right) > \delta_H > \left(\frac{10}{333}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 333}\right)$ $\left(\frac{10}{333}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 333}\right) > \delta_V > \left(\frac{10}{500}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 500}\right)$	Comunicação às entidades envolvidas, acompanhamento especial, verificação de leituras, elaboração de plano de ação.
3 (Alarme)	$\delta_H > H/200$ $\delta_V > H/333$	$\delta_H > \left(\frac{10}{200}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 200}\right)$ $\delta_V > \left(\frac{10}{333}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 333}\right)$	Comunicação às entidades envolvidas, verificação de leituras, aumento da frequência de leituras e aplicação de medidas de reposição de segurança.

Comparando os Quadros 8 e 12 é possível observar que a grande diferença entre os critérios base e os critérios propostos é a divisão dos Muros de Betão Armados, em muros com altura inferior a 10 m e superior a 10 m. Com a criação de um novo critério para os muros superiores a 10 m foi possível resolver o problema detetado durante a aplicação dos critérios base.

O critério proposto para Muros de Betão Armado com mais de 10 m permite reduzir os valores obtidos para os níveis de alerta e de alarme de muros com uma altura superior aos 10 m, tendo como base o critério para muros inferiores a 10 m.

No Quadro 13 são apresentados os níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Terra Armada e o conjunto de ações que devem ser realizadas caso algum destes critérios seja ultrapassado.

Quadro 13. Níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Terra Armada

Nível	Critérios para Muros de Terra Armada		Ações
	Topografia/Inclinómetros		
	$H \leq 10$ m	$H > 10$ m	
1 (Estável)	$\delta_H < H/267$ $\delta_V < H/500$	$\delta_H < \left(\frac{10}{267}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 267}\right)$ $\delta_V < \left(\frac{10}{500}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 500}\right)$	Estável.
2 (Alerta)	$H/150 > \delta_H > H/267$ $H/333 > \delta_V > H/500$	$\left(\frac{10}{150}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 150}\right) > \delta_H > \left(\frac{10}{267}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 267}\right)$ $\left(\frac{10}{333}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 333}\right) > \delta_V > \left(\frac{10}{500}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 500}\right)$	Comunicação às entidades envolvidas, acompanhamento especial, verificação de leituras, elaboração de plano de ação.
3 (Alarme)	$\delta_H > H/150$ $\delta_V > H/333$	$\delta_H > \left(\frac{10}{150}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 150}\right)$ $\delta_V > \left(\frac{10}{333}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 333}\right)$	Comunicação às entidades envolvidas, verificação de leituras, aumento da frequência de leituras e aplicação de medidas de reposição de segurança.

Comparando os Quadros 9 e 13 é possível observar que a grande diferença entre os critérios base e os critérios propostos é a divisão dos Muros de Terra Armada, em muros com altura inferior a 10 m e superior a 10 m. Com a criação de um novo critério para os muros superiores a 10 m foi possível resolver o problema detetado durante a aplicação dos critérios base.

O critério proposta para Muros de Terra Armada com mais de 10 m permite reduzir os valores obtidos para os níveis de alerta e de alarme de muros com uma altura superior aos 10 m, tendo como base o critério para muros inferiores a 10 m.

No Quadro 14 são apresentados os níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Gabiões e o conjunto de ações que devem ser realizadas caso algum destes critérios seja ultrapassado.

Quadro 14. Níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Gabiões

Nível	Critérios para Muros de Gabiões		Ações
	Topografia/Inclinómetros		
	$H \leq 10$ m	$H > 10$ m	
1 (Estável)	$\delta_H < H/225$ $\delta_V < H/500$	$\delta_H < \left(\frac{10}{225}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 225}\right)$ $\delta_V < \left(\frac{10}{500}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 500}\right)$	Estável.
2 (Alerta)	$H/125 > \delta_H > H/225$ $H/333 > \delta_V > H/500$	$\left(\frac{10}{100}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 125}\right) > \delta_H > \left(\frac{10}{225}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 225}\right)$ $\left(\frac{10}{333}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 333}\right) > \delta_V > \left(\frac{10}{500}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 500}\right)$	Comunicação às entidades envolvidas, acompanhamento especial, verificação de leituras, elaboração de plano de ação.
3 (Alarme)	$\delta_H > H/125$ $\delta_V > H/333$	$\delta_H > \left(\frac{10}{125}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 125}\right)$ $\delta_V > \left(\frac{10}{333}\right) + \left(\frac{H-10}{2 \times 333}\right)$	Comunicação às entidades envolvidas, verificação de leituras, aumento da frequência de leituras e aplicação de medidas de reposição de segurança.

Comparando os Quadros 10 e 14 é possível observar que a grande diferença entre os critérios base e os critérios propostos é a divisão dos Muros de Gabiões, em muros com altura inferior a 10 m e superior a 10 m. Com a criação de um novo critério para os muros superiores a 10 m, foi possível resolver o problema detetado durante a aplicação dos critérios base.

O critério proposta para Muros de Gabiões com mais de 10 m permite reduzir os valores obtidos para os níveis de alerta e de alarme de muros com uma altura superior aos 10 m, tendo como base o critério para muros inferiores a 10 m.

Outra alteração realizada foi o ajuste do critério base, tendo-se alterado o valor pelo qual a altura do muro é dividida, permitindo assim que os valores obtidos pelo critério proposta para os critérios de alerta e de alarme sejam um pouco inferiores aos valores obtidos pelo critério base. Desta forma, foi possível resolver o problema que foi detetado durante a aplicação dos critérios base a Muros de Gabiões, e ajustar melhor o critério proposto ao tipo de comportamento que é esperado para esta tipologia de muro.

Para possibilitar a melhor interpretação destes critérios de alerta e de alarme propostos, e a semelhança do que foi realizado para os critérios de alerta e de alarme base, foram desenvolvidos os seguintes gráficos.

O Gráfico 15 apresenta os níveis de alerta correspondentes a deslocamentos horizontais propostos para as diferentes tipologias de muros e em função da altura do muro.

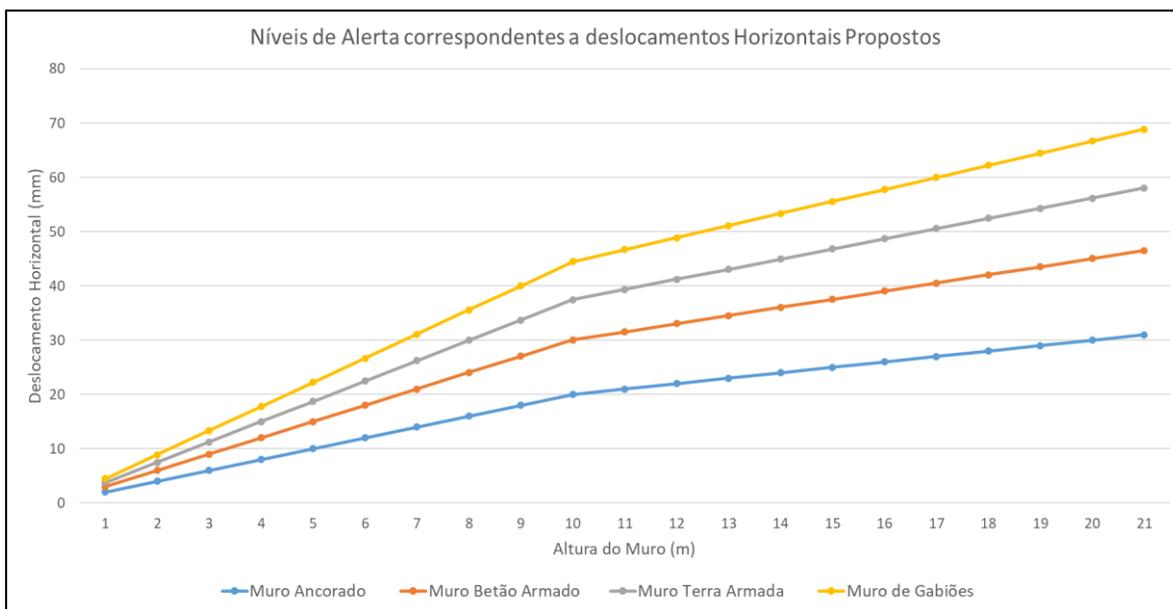


Gráfico 15. Níveis de alerta correspondentes a deslocamentos horizontais propostos

No gráfico anterior é possível observar como os valores dos níveis de alerta correspondentes a deslocamentos horizontais propostos vão aumentando conforme a altura do muro aumenta; e a diferença que existe nos valores entre as diferentes tipologias de muros.

Comparando os Gráficos 11 e 15 é possível observar as diferenças que existem entre eles, principalmente devido à divisão dos critérios que são aplicados a muros com menos de 10 m de altura e os aplicados a muros com mais de 10 m de altura.

É possível observar no Gráfico 15 que nas retas que representam os níveis de alerta horizontais para qualquer tipologia de muros, quando alcançam alturas superiores aos 10 m ocorre uma diminuição da sua inclinação para metade. Desta forma, os valores obtidos para os critérios são menores para muros superiores a 10 m. Esta observação aplica-se aos restantes gráficos onde serão apresentados os restantes critérios de alerta e de alarme.

Outra diferença que é observada pela comparação dos Gráficos 11 e 15 é a diminuição dos valores obtidos para os Muros de Gabiões, que resultaram do ajuste dos critérios base. Esta observação aplica-se também aos restantes gráficos onde serão apresentados os restantes critérios.

O Gráfico 16 apresenta os níveis de alarme correspondentes a deslocamentos horizontais propostos para as diferentes tipologias de muros e em função da altura do muro.

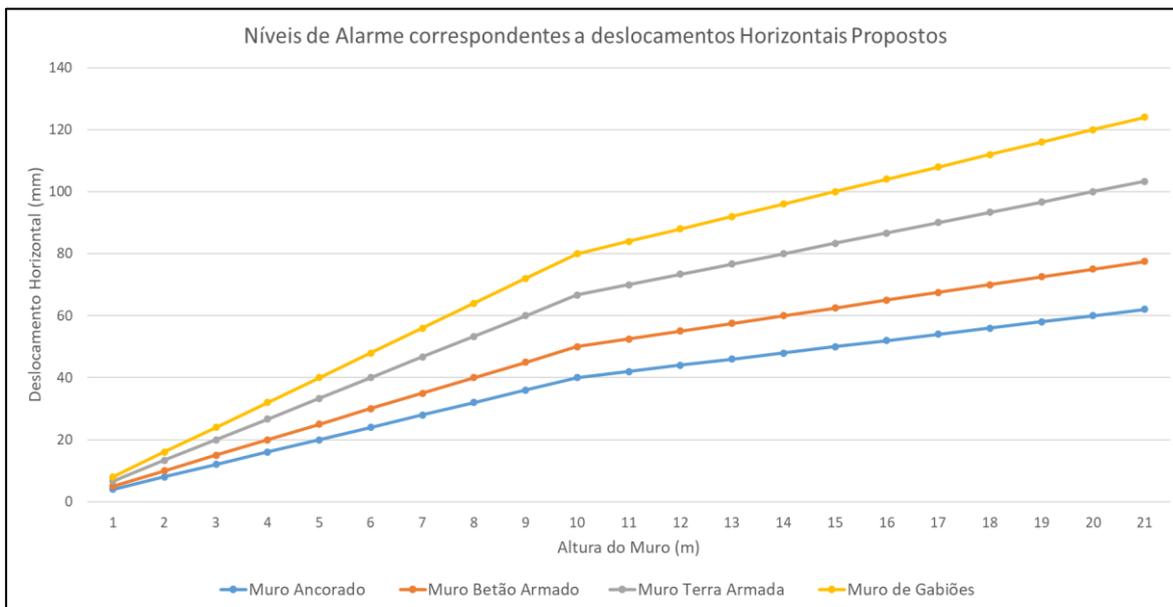


Gráfico 16. Níveis de alarme correspondentes a deslocamentos horizontais propostos

No gráfico anterior é possível observar como os valores dos níveis de alarme correspondentes a deslocamentos horizontais propostos vão aumentando conforme a altura do muro aumenta e a diferença que existe nos valores entre as diferentes tipologias de muros.

O Gráfico 17 apresenta os níveis de alerta correspondentes a deslocamentos verticais propostos para as diferentes tipologias de muros e em função da altura do muro.

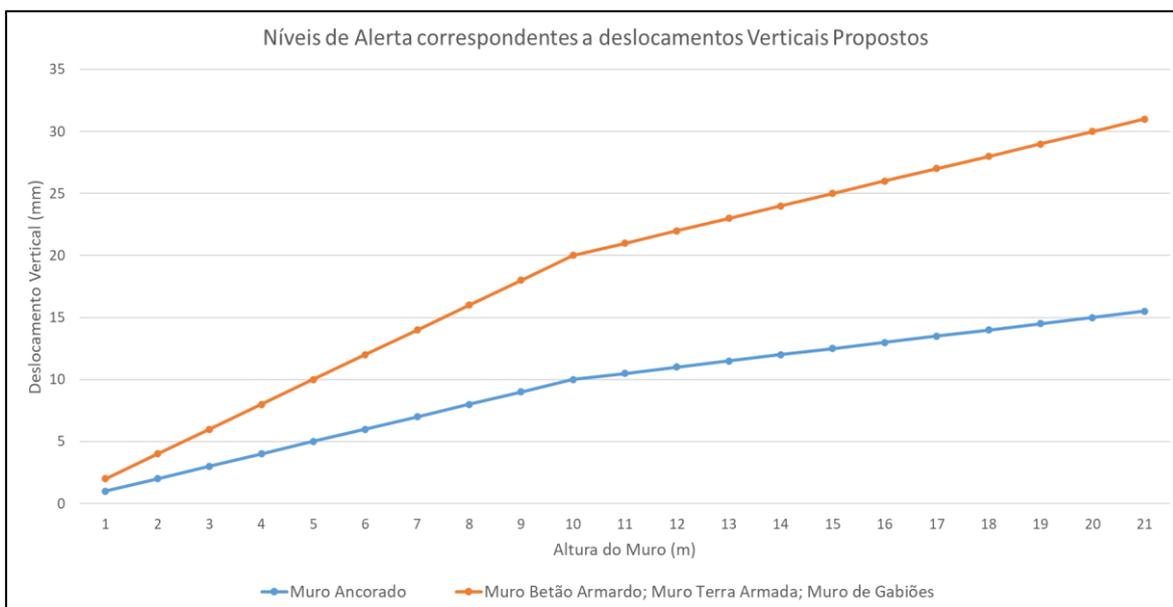


Gráfico 17. Níveis de alerta correspondentes a deslocamentos verticais propostos

No gráfico anterior é possível observar como os valores dos níveis de alerta verticais propostos vão aumentando conforme a altura do muro aumenta e a diferença que existe nos valores entre as diferentes tipologias de muros.

Neste gráfico, é apenas possível observar duas linhas referentes aos níveis de alerta correspondentes a deslocamentos verticais, pois o critério proposto para os Muros de Betão Armado, os Muros de Terra Armada e os Muros de Gabiões é o mesmo.

O Gráfico 18 apresenta os níveis de alarme correspondentes a deslocamentos verticais propostos para as diferentes tipologias de muros e em função da altura do muro.

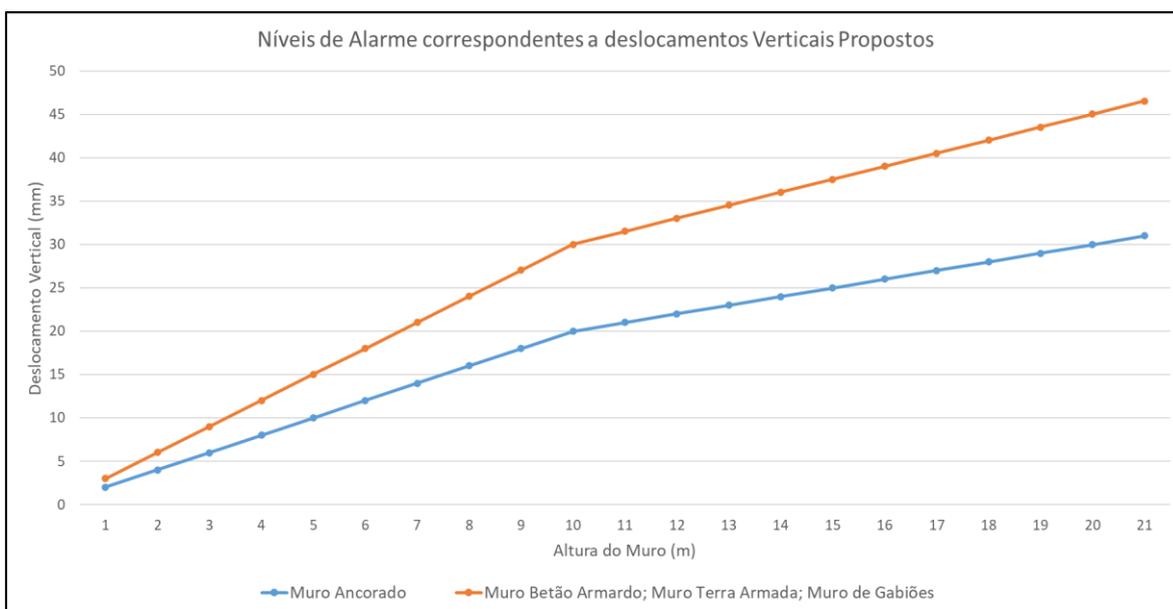


Gráfico 18. Níveis de alarme correspondentes a deslocamentos verticais propostos

No gráfico anterior é possível observar como os valores dos níveis de alarme verticais propostos vão aumentando conforme a altura do muro aumenta e a diferença que existe nos valores entre as diferentes tipologias de muros.

Neste gráfico, é apenas possível observar duas linhas referentes aos níveis de alerta correspondentes a deslocamentos verticais, pois o critério proposto para os Muros de Betão Armado, os Muros de Terra Armada e os Muros de Gabiões é o mesmo.

É de salientar que, como já foi referido anteriormente, alguns dos muros onde foram aplicados estes critérios de alerta e de alarme já apresentavam um Plano de Instrumentação e Observação. Da comparação entre os critérios de alerta e de alarme propostos e os definidos pelos projetos observou-se que os critérios propostos eram mais conservados do que os definidos em projeto. Desta forma, é possível concluir que os critérios propostos vão permitir antecipar a deteção comportamentos de instabilidade/anormais dos muros, atuando assim pelo lado da segurança.

Os gráficos seguintes apresentam os critérios de alerta e alarme correspondentes a deslocamentos horizontais e verticais propostos individualmente para cada tipologia de muro e a média dos deslocamentos horizontais e verticais observados por alvos topográficos para as estruturas em questão.

Com estes gráficos pretende-se ter uma visão geral do nível em que cada estrutura se encontra, para uma avaliação mais ao pormenor é fundamental recorrer as fichas de monitorização desenvolvidas individualmente. Nas fichas de monitorização individuais os critérios de alerta e de alarme aqui propostos encontram-se aplicados a todas as leituras realizadas pelo conjunto de equipamentos de monitorização instalados nas respetivas estruturas e desta forma é possível conhecer ao pormenor o tipo de comportamento que a estrutura está a apresentar.

O Gráfico 19 apresenta os deslocamentos horizontais medidos em Muros Ancorados e o seu enquadramento relativamente aos níveis de alerta e de alarme propostos.

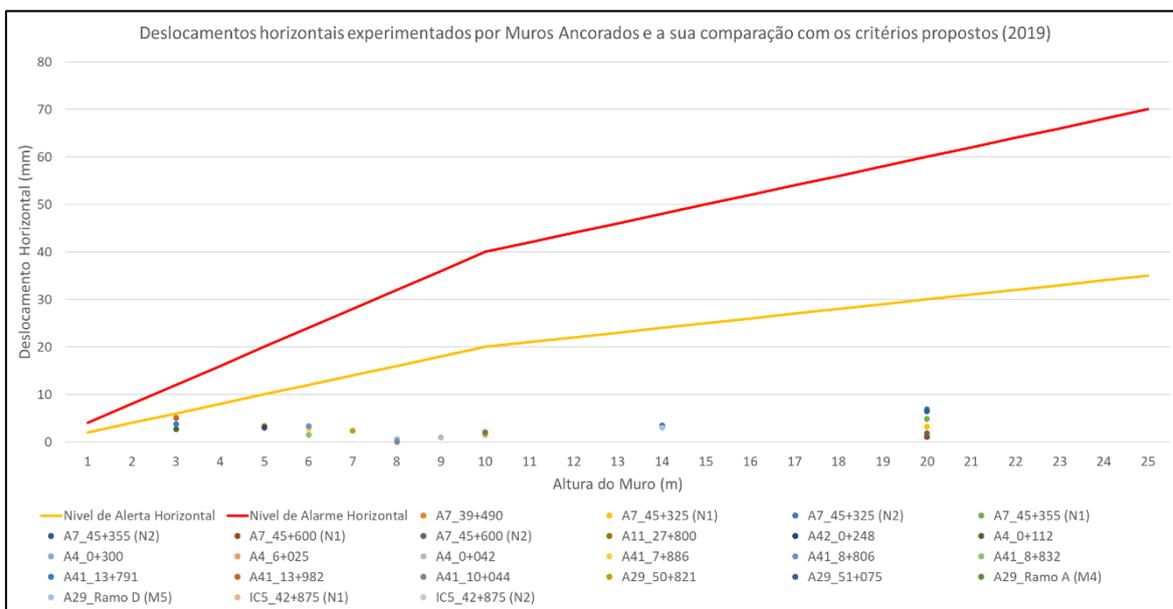


Gráfico 19. Deslocamentos horizontais experimentados por Muros Ancorados

O Gráfico 20 apresenta os deslocamentos verticais medidos em Muros Ancorados e o seu enquadramento relativamente aos níveis de alerta e de alarme propostos.

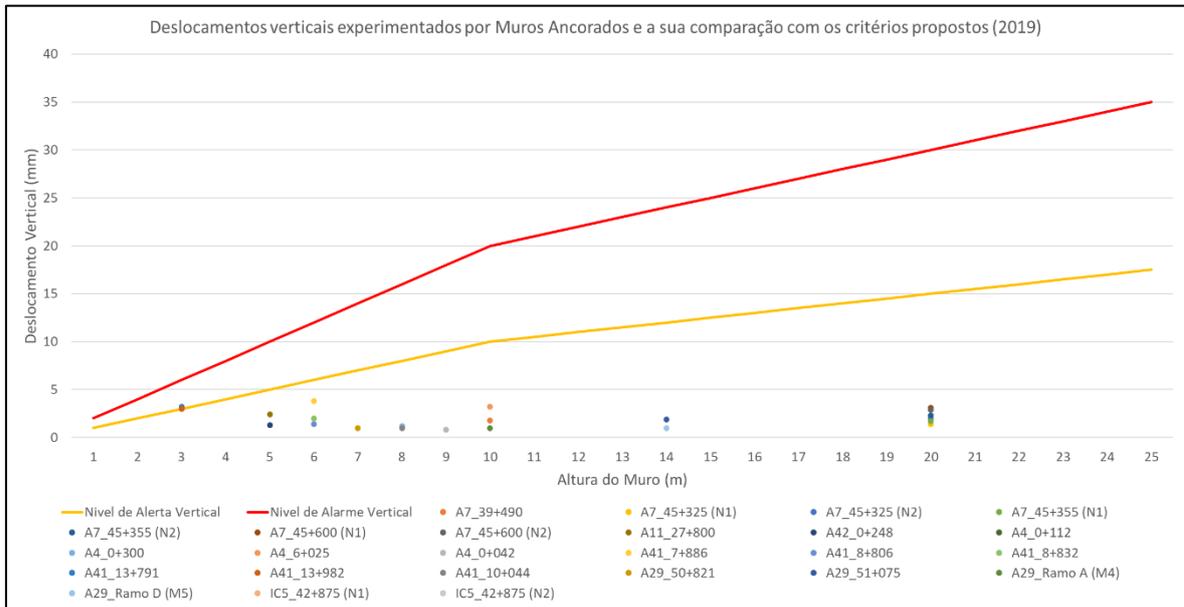


Gráfico 20. Deslocamentos verticais experimentados por Muros Ancorados

O Gráfico 21 apresenta os deslocamentos horizontais medidos em Muros de Betão Armado e o seu enquadramento relativamente aos níveis de alerta e de alarme propostos.

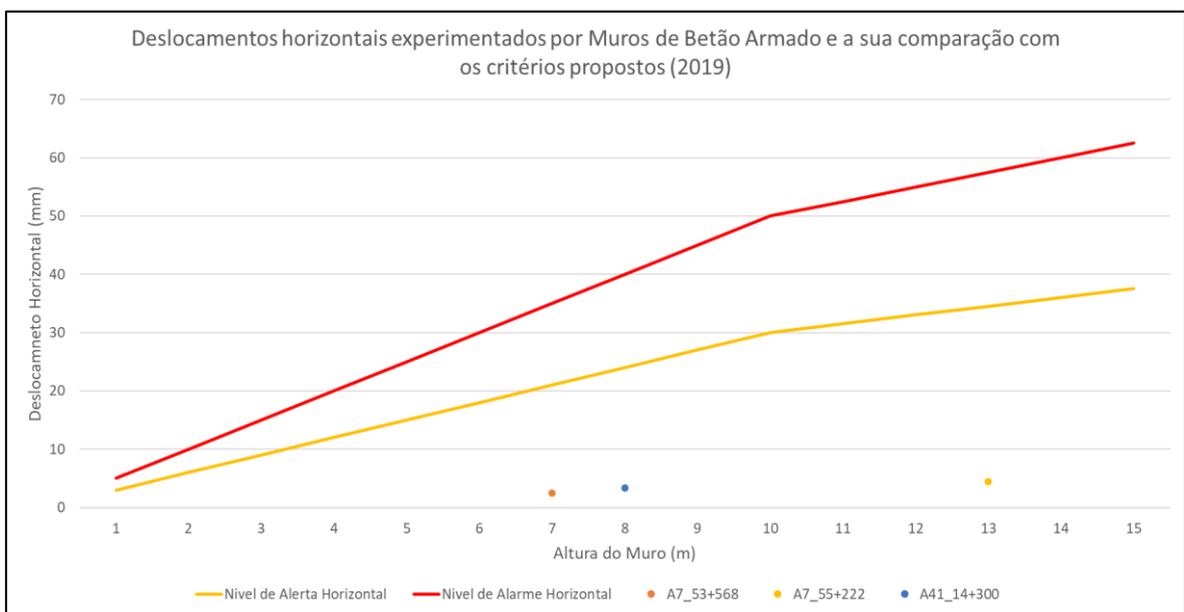


Gráfico 21. Deslocamentos horizontais experimentados por Muros de Betão Armada

O Gráfico 22 apresenta os deslocamentos verticais medidos em Muros de Betão Armado e o seu enquadramento relativamente aos níveis de alerta e de alarme propostos.

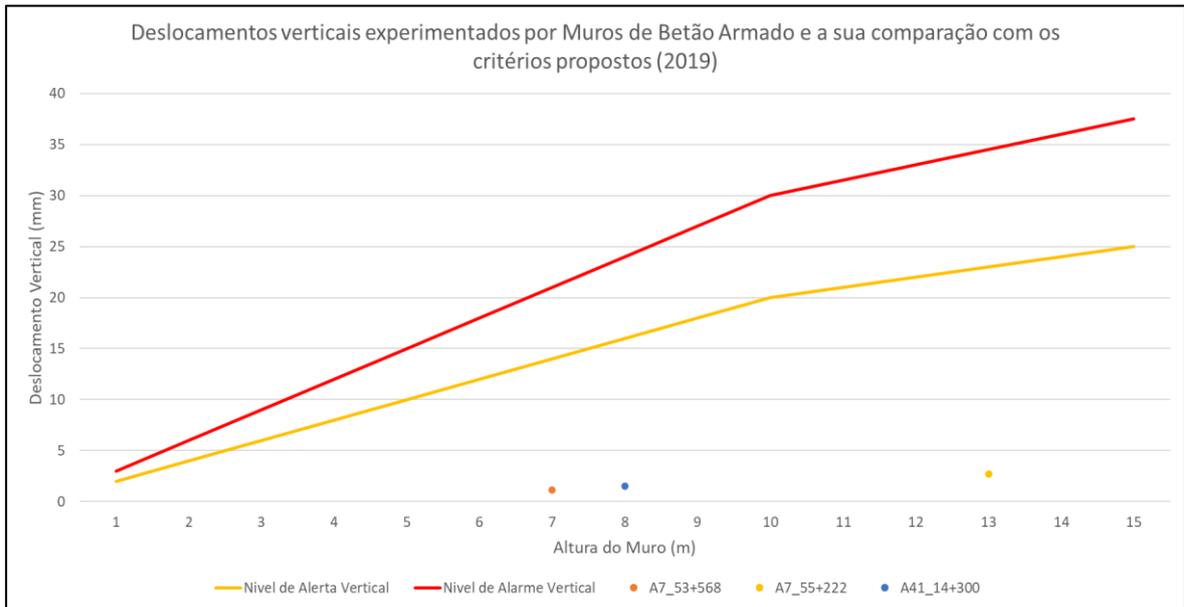


Gráfico 22. Deslocamentos verticais experimentados por Muros de Betão Armada

O Gráfico 23 apresenta os deslocamentos horizontais medidos em Muros de Terra Armada e o seu enquadramento relativamente aos níveis de alerta e de alarme propostos.

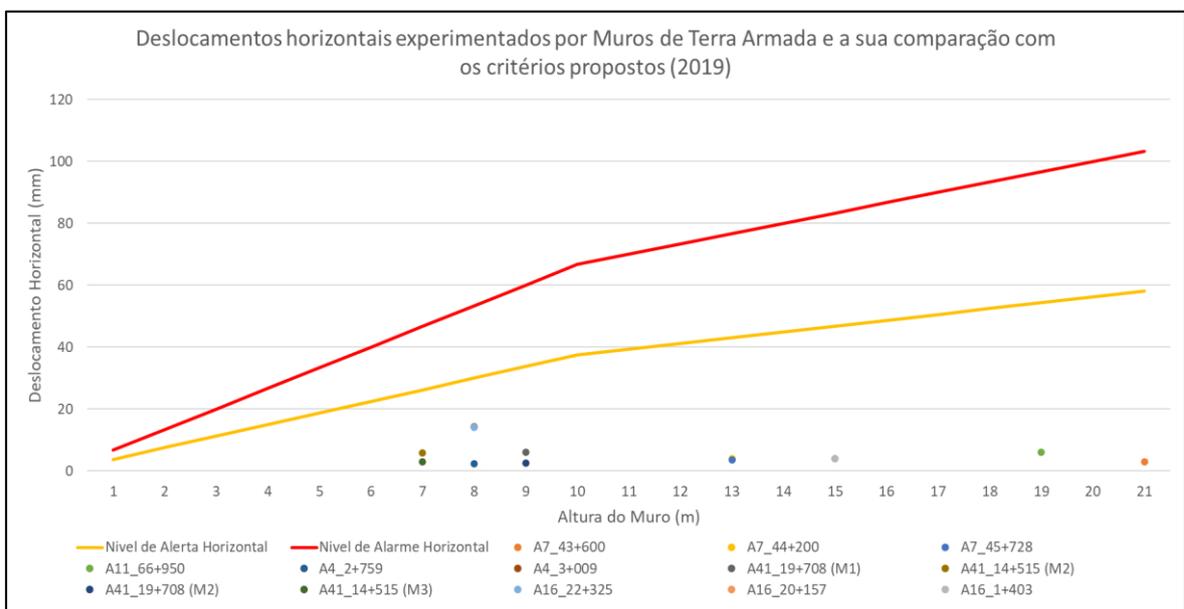


Gráfico 23. Deslocamentos horizontais experimentados por Muros de Terra Armada

O Gráfico 24 apresenta os deslocamentos verticais medidos em Muros de Terra Armada e o seu enquadramento relativamente aos níveis de alerta e de alarme propostos.

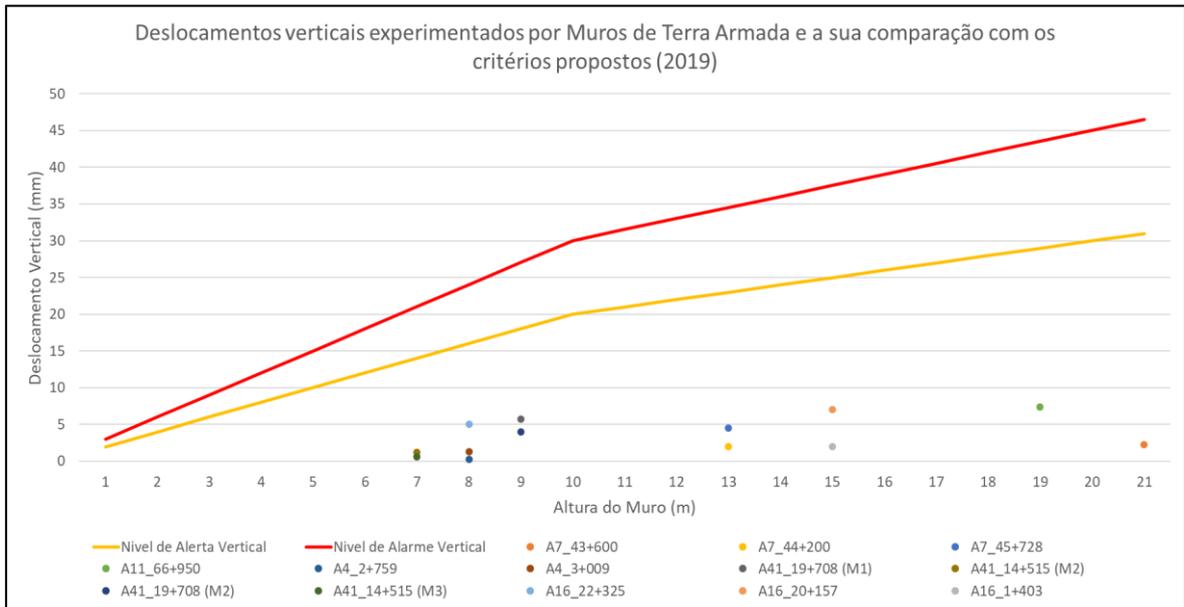


Gráfico 24. Deslocamentos verticais experimentados por Muros de Terra Armada

O Gráfico 25 apresenta os deslocamentos horizontais medidos em Muros de Gabiões e o seu enquadramento relativamente aos níveis de alerta e de alarme propostos.

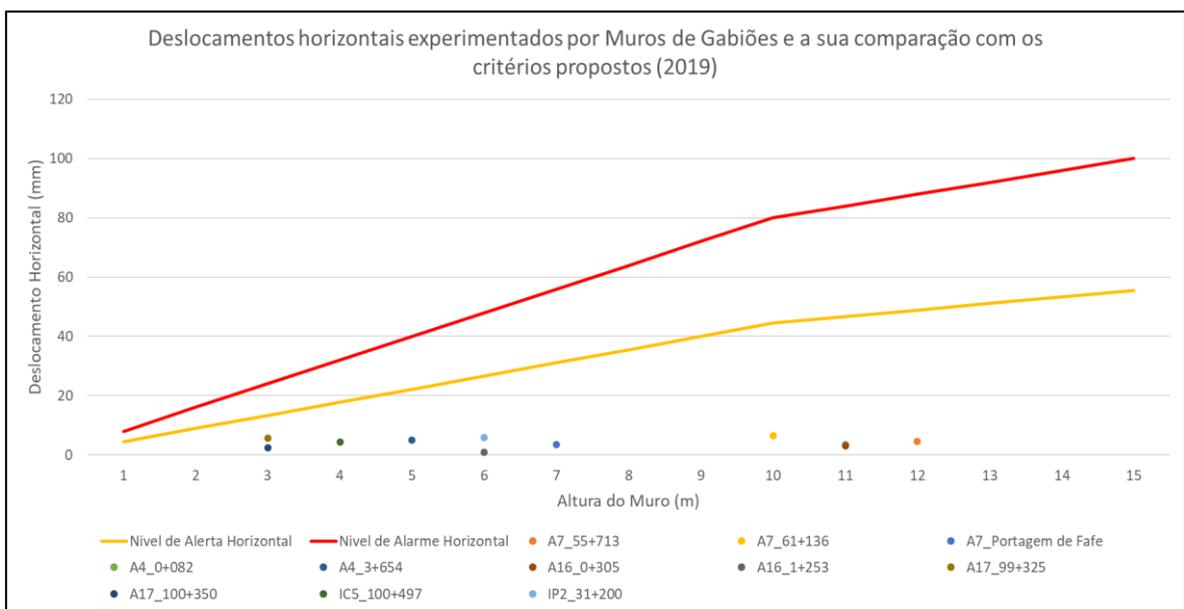


Gráfico 25. Deslocamentos horizontais experimentados por Muros de Gabiões

O Gráfico 26 apresenta os deslocamentos verticais medidos em Muros de Gabiões e o seu enquadramento relativamente aos níveis de alerta e de alarme propostos.

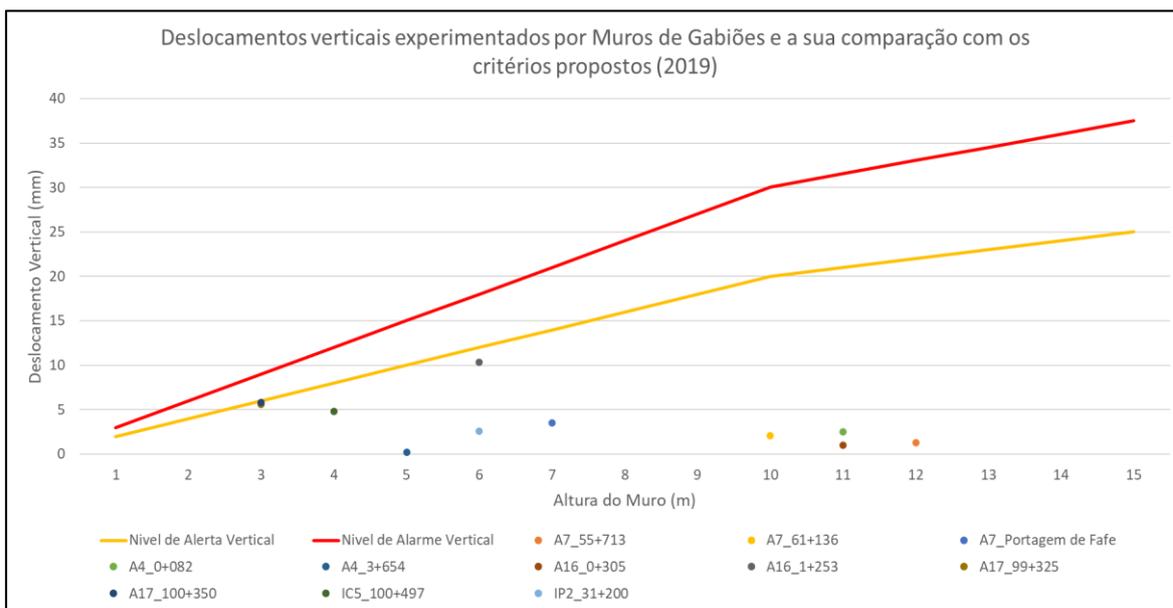


Gráfico 26. Deslocamentos verticais experimentados por Muros de Gabiões

Estes gráficos vão permitir, após serem analisadas as leituras realizadas para cada muro individualmente, ter uma noção global do nível em que se encontram todos os muros que apresentam alvos topográficos instalados no grupo de Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I.

Nas fichas de monitorização individuais, os critérios de alerta e de alarme aqui propostos encontram-se aplicados a todas as leituras realizadas pelo conjunto de alvos topográficos instalados nas respetivas estruturas. Desta forma é possível conhecer ao pormenor, tendo por base as leituras realizadas utilizando alvos topográficos, o tipo de comportamento que cada estrutura está a apresentar.

Os gráficos seguintes apresentam os critérios de alerta e alarme propostos, para variação da carga em Células de Carga e a média das variações observadas em cada estrutura em questão. Com estes gráficos pretende-se ter uma visão geral do nível em que cada estrutura se encontra. Para uma avaliação mais ao pormenor é fundamental recorrer as fichas de monitorização desenvolvidas individualmente. Nas fichas de monitorização individuais, os critérios de alerta e de alarme aqui propostos encontram-se aplicados a todas as leituras realizadas pelo conjunto de células de carga instalados nas respetivas estruturas. Desta forma é possível conhecer ao pormenor, tendo por base as leituras realizadas, o tipo de comportamento que cada estrutura está a apresentar.

O Gráfico 27 apresenta as variações das cargas em células de carga em muros e taludes da Concessão Norte, enquadradas com os níveis de alerta e de alarme propostos.

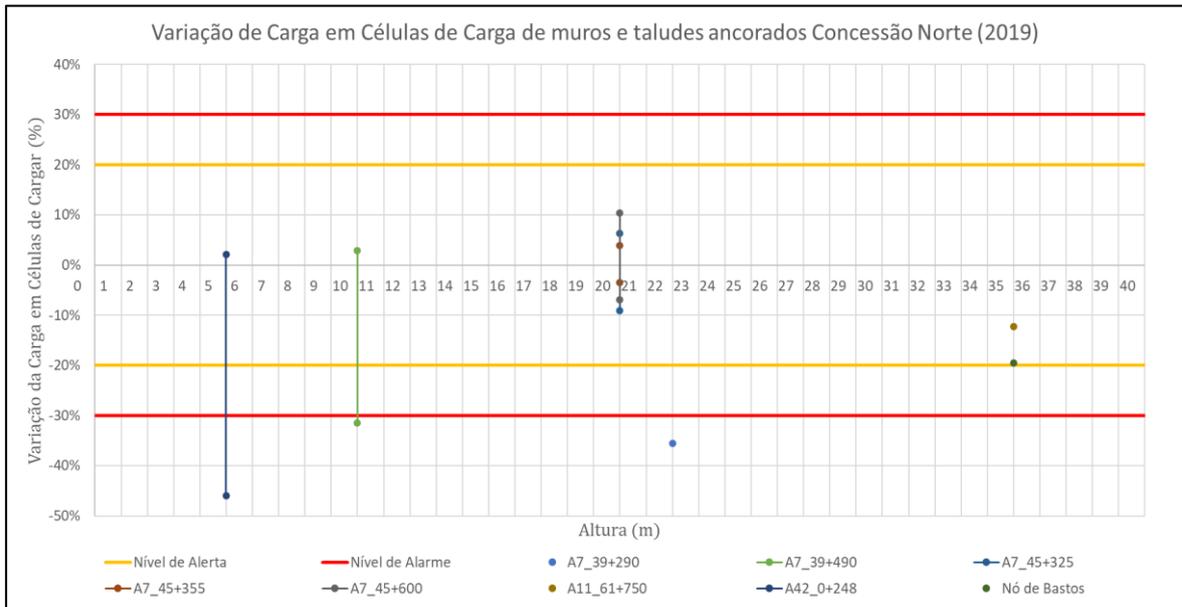


Gráfico 27. Variação de carga em células de carga de muros e taludes ancorados da Concessão Norte

O Gráfico 28 apresenta as variações das cargas em células de carga em muros e taludes da Concessão Grande Porto, enquadradas com os níveis de alerta e de alarme propostos.

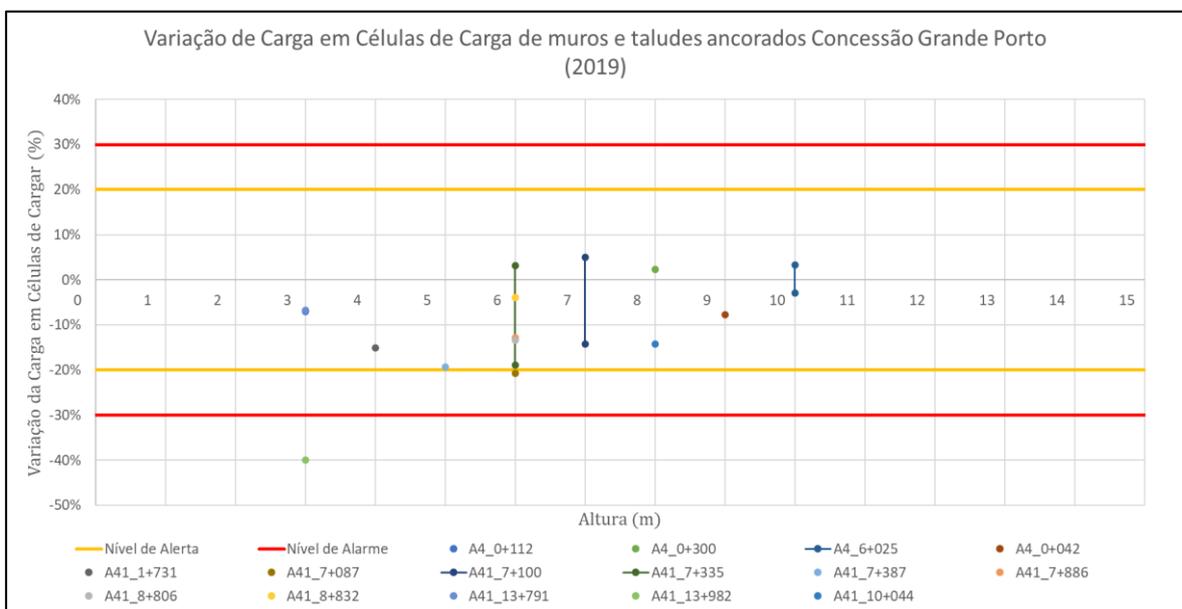


Gráfico 28. Variação de carga em células de carga de muros e taludes ancorados da Concessão Grande Porto

O Gráfico 29 apresenta as variações das cargas em células de carga em muros e taludes da Concessão Costa de Prata, enquadradas com os níveis de alerta e de alarme propostos.

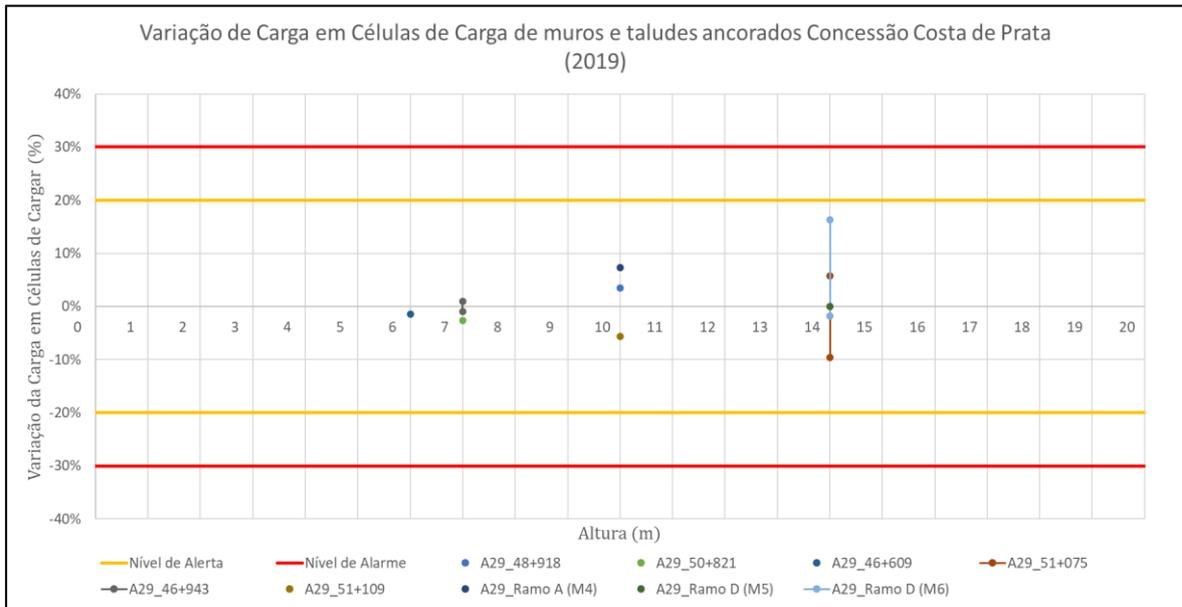


Gráfico 29. Variação de carga em células de carga de muros e taludes ancorados da Concessão Costa de Prata

O Gráfico 30 apresenta as variações das cargas em células de carga em muros e taludes da Concessão Beiras Litoral e Alta, enquadradas com os níveis de alerta e de alarme propostos.

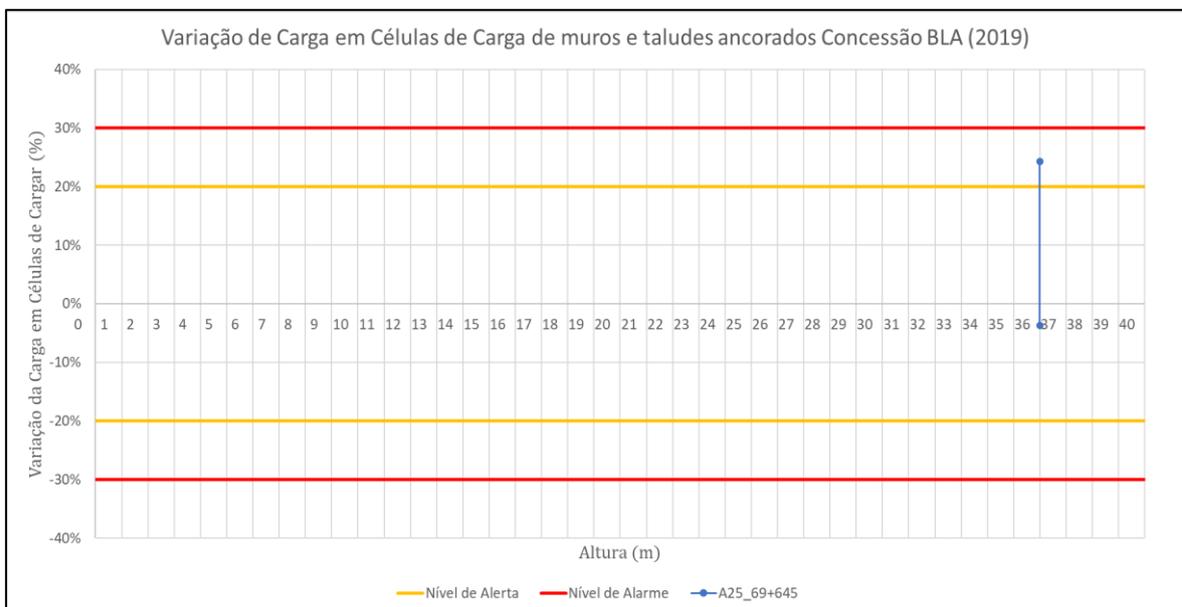


Gráfico 30. Variação de carga em células de carga de muros e taludes ancorados da Concessão Beiras Litoral e Alta

O Gráfico 31 apresenta as variações das cargas em células de carga em muros e taludes da Subconcessão Douro Interior, enquadradas com os níveis de alerta e de alarme propostos.

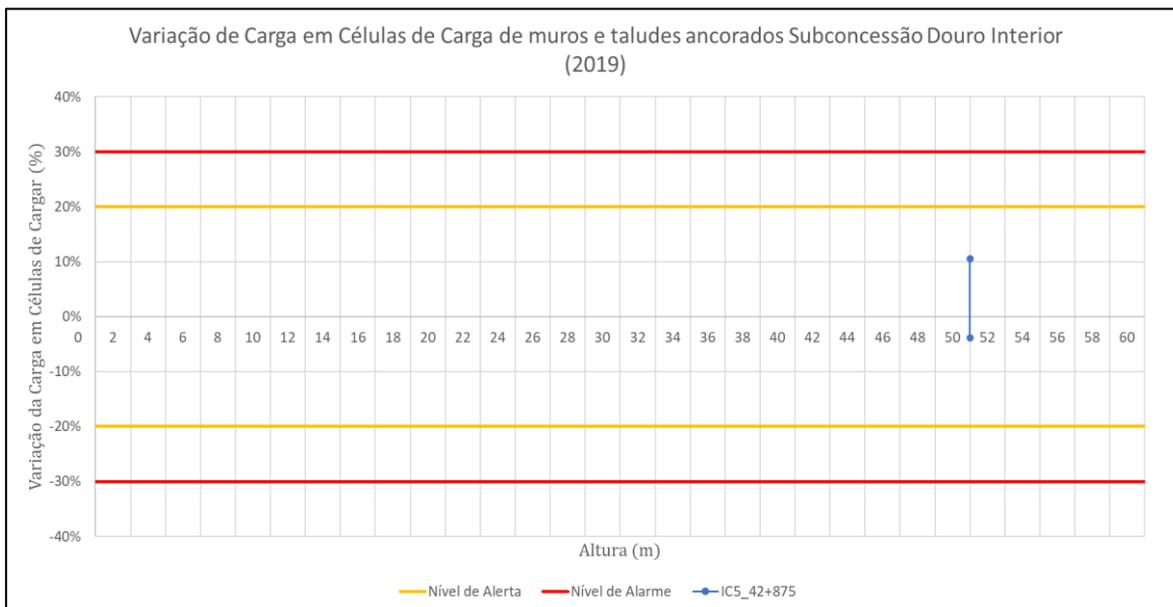


Gráfico 31. Variação de carga em células de carga de muros e taludes ancorados da Subconcessão Douro Interior

Os valores apresentados nos gráficos referentes aos deslocamentos são obtidos através da realização de uma média para os valores dos deslocamentos na direção vertical e a realização de uma média para os valores dos deslocamentos na direção horizontal perpendicular a superfície da estrutura. Desta forma pretende-se controlar os deslocamentos que são mais prejudiciais à estabilidade da estrutura e obter-se um ponto para representar em cada gráfico respetivo.

Relativamente aos gráficos da variação da carga em ancoragens, são realizadas duas médias distintas para a mesma estrutura, uma para células de carga onde se observa ganho de carga e outra para células de carga onde se observa perda de carga. Por esse motivo, algumas estruturas representadas nos gráficos anteriores apresentam dois pontos ligados por uma reta, nestes casos em algumas das células de carga instaladas foi observado ganho de carga e noutras foi detetada perda de carga. Casos em que a estrutura apenas apresente um ponto, é possível concluir que todas as células de carga instaladas têm a mesma tendência de ganho ou perda de carga. Estes gráficos vão permitir, após serem analisadas as leituras realizadas para cada muro individualmente, ter uma noção global do nível em que se encontram todos os muros e taludes.

A interpretação destes gráficos será realizada no capítulo seguinte, juntamente com a análise estatística de um conjunto de parâmetros fundamentais para observar a necessidade de definição dos critérios de alerta e de alarme propostos.

### 4.3. Sugestão para a Representação e Interpretação dos Critérios de Alerta e de Alarme Propostos

Tendo por base os critérios de alerta e de alarme propostos para muros e taludes, foi desenvolvida posteriormente e apresentada uma sugestão, com o objetivo de facilitar a interpretação e a análise dos dados relativos aos deslocamentos horizontais e verticais observados através de alvos topográficos. A sugestão estudada passou por desenvolver um gráfico, para cada tipologia de estrutura, apresentando no eixo do X os deslocamentos horizontais e no eixo do Y os deslocamentos verticais, permitindo assim: I) - correlacionar os dois deslocamentos e II) - observar toda a informação disponível apenas num único gráfico.

Como é possível observar nos quadros anteriores, os critérios para o cálculo dos níveis de alerta e de alarme, para todas as tipologias de muros, encontram-se dependentes da altura dos mesmos. Este facto, impossibilitava a representação de muros com diferentes alturas nos gráficos acima enunciados, dado que muros com alturas diferentes apresentam critérios de alerta e de alarme distintos. Com o objetivo de ultrapassar esta questão, os deslocamentos representados nos gráficos serão divididos por H, ou seja, a altura do muro; desta forma, é possível representar num único gráfico todos os muros da mesma tipologia.

Os critérios apresentados nos quadros seguintes foram desenvolvidas tendo por base os critérios de alerta e de alarme propostos anteriormente e permitem o cálculo dos deslocamentos horizontais e verticais, possibilitando a representação simultânea dos dois deslocamentos nos gráficos sugeridos.

No Quadro 15 são apresentados os níveis de alerta e de alarme e o critério para o cálculo dos deslocamentos para Muros Ancorados.

Quadro 15. Sugestão para a representação dos critérios de alerta e de alarme para Muros Ancorados

Nível	Sugestão para Muros Ancorados	
	$H \leq 10$ m	$H > 10$ m
1 (Estável)	$\frac{\delta_H}{H} < 1/500$ $\frac{\delta_V}{H} < 1/1000$	$2 \times \left( \frac{\delta_H}{10 + H} \right) < 1/500$ $2 \times \left( \frac{\delta_V}{10 + H} \right) < 1/1000$
2 (Alerta)	$1/250 > \frac{\delta_H}{H} > 1/500$ $1/500 > \frac{\delta_V}{H} > 1/1000$	$1/250 > 2 \times \left( \frac{\delta_H}{10 + H} \right) > 1/500$ $1/500 > 2 \times \left( \frac{\delta_V}{10 + H} \right) > 1/1000$
3 (Alarme)	$\frac{\delta_H}{H} > 1/250$ $\frac{\delta_V}{H} > 1/500$	$2 \times \left( \frac{\delta_H}{10 + H} \right) > 1/250$ $2 \times \left( \frac{\delta_V}{10 + H} \right) > 1/500$

Como é possível observar pelo quadro anterior, os níveis de alerta e de alarme são iguais para todos os Muros Ancorados, independentemente das alturas dos mesmos.

No Quadro 16 são apresentados os níveis de alerta e de alarme e o critério para o cálculo dos deslocamentos para Muros de Betão Armado.

Quadro 16. Sugestão para a representação dos critérios de alerta e de alarme para Muros de Betão Armado

Nível	Sugestão para Muros de Betão Armado	
	$H \leq 10$ m	$H > 10$ m
1 (Estável)	$\frac{\delta_H}{H} < 1/333$ $\frac{\delta_V}{H} < 1/500$	$2 \times \left(\frac{\delta_H}{10+H}\right) < 1/333$ $2 \times \left(\frac{\delta_V}{10+H}\right) < 1/500$
2 (Alerta)	$1/200 > \frac{\delta_H}{H} > 1/333$ $1/333 > \frac{\delta_V}{H} > 1/500$	$1/200 > 2 \times \left(\frac{\delta_H}{10+H}\right) > 1/333$ $1/333 > 2 \times \left(\frac{\delta_V}{10+H}\right) > 1/500$
3 (Alarme)	$\frac{\delta_H}{H} > 1/200$ $\frac{\delta_V}{H} > 1/333$	$2 \times \left(\frac{\delta_H}{10+H}\right) > 1/200$ $2 \times \left(\frac{\delta_V}{10+H}\right) > 1/333$

Como é possível observar pelo quadro anterior, os níveis de alerta e de alarme são iguais para todos os Muros de Betão Armado, independentemente das alturas dos mesmos.

No Quadro 17 são apresentados os níveis de alerta e de alarme e o critério para o cálculo dos deslocamentos para Muros de Terra Armada.

Quadro 17. Sugestão para a representação dos critérios de alerta e de alarme para Muros de Terra Armada

Nível	Sugestão para Muros de Terra Armada	
	$H \leq 10$ m	$H > 10$ m
1 (Estável)	$\frac{\delta_H}{H} < 1/267$ $\frac{\delta_V}{H} < 1/500$	$2 \times \left(\frac{\delta_H}{10+H}\right) < 1/267$ $2 \times \left(\frac{\delta_V}{10+H}\right) < 1/500$
2 (Alerta)	$1/150 > \frac{\delta_H}{H} > 1/267$ $1/333 > \frac{\delta_V}{H} > 1/500$	$1/150 > 2 \times \left(\frac{\delta_H}{10+H}\right) > 1/267$ $1/333 > 2 \times \left(\frac{\delta_V}{10+H}\right) > 1/500$
3 (Alarme)	$\frac{\delta_H}{H} > 1/150$ $\frac{\delta_V}{H} > 1/333$	$2 \times \left(\frac{\delta_H}{10+H}\right) > 1/150$ $2 \times \left(\frac{\delta_V}{10+H}\right) > 1/333$

Como é possível observar pelo quadro anterior, os níveis de alerta e de alarme são iguais para todos os Muros de Terra Armada, independentemente das alturas dos mesmos.

No Quadro 18 são apresentados os níveis de alerta e de alarme e o critério para o cálculo dos deslocamentos para Muros de Gabiões.

Quadro 18. Sugestão para a representação dos critérios de alerta e de alarme para Muros de Gabiões

Nível	Sugestão para Muros de Gabiões	
	$H \leq 10$ m	$H > 10$ m
1 (Estável)	$\frac{\delta_H}{H} < 1/225$ $\frac{\delta_V}{H} < 1/500$	$2 \times \left( \frac{\delta_H}{10 + H} \right) < 1/225$ $2 \times \left( \frac{\delta_V}{10 + H} \right) < 1/500$
2 (Alerta)	$1/125 > \frac{\delta_H}{H} > 1/255$ $1/333 > \frac{\delta_V}{H} > 1/500$	$1/125 > 2 \times \left( \frac{\delta_H}{10 + H} \right) > 1/225$ $1/333 > 2 \times \left( \frac{\delta_V}{10 + H} \right) > 1/500$
3 (Alarme)	$\frac{\delta_H}{H} > 1/125$ $\frac{\delta_V}{H} > 1/333$	$2 \times \left( \frac{\delta_H}{10 + H} \right) > 1/125$ $2 \times \left( \frac{\delta_V}{10 + H} \right) > 1/333$

Como é possível observar pelo quadro anterior, os níveis de alerta e de alarme são iguais para todos os Muros Gabiões, independentemente das alturas dos mesmos.

Para os Taludes de Aterro e de Escavação não foi necessário realizar alterações nos critérios de alerta e de alarme, uma vez que os critérios de alerta e de alarme anteriormente propostos não dependem da sua altura.

Após a forma de cálculo dos deslocamentos horizontais e verticais estar definida para muros e taludes, seguiu-se a representação gráfica dos resultados obtidos da leitura de alvos topográficos e a representação das linhas referentes aos critérios de alerta e de alarme.

Para a representação dos resultados das leituras, após os deslocamentos horizontais e verticais observados por alvos topográficos serem aplicados nos critérios apresentados anteriormente, no eixo horizontal serão representados os  $\frac{\delta_H}{H}$  e no eixo vertical serão representados os  $\frac{\delta_V}{H}$ .

Com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados obtidos, através da aplicação dos critérios anteriores, os níveis de alerta e de alarme e os resultados obtidos serão expressos em forma de percentagem. Obtendo-se assim a percentagens de deslocamentos horizontais e verticais relativamente à altura do muro.

---

O Quadro 19 apresenta os níveis de alerta e de alarme para as diferentes tipologias de muro, em percentagem.

Quadro 19. Níveis de Alerta e de Alarme para as diferentes tipologias de muro definidos como percentagem de deslocamento

Tipo de Muros	Deslocamentos Horizontais		Deslocamentos Verticais	
	Nível de Alerta	Nível de Alarme	Nível de Alerta	Nível de Alarme
Muro Ancorado	0,20 %	0,40 %	0,10 %	0,20 %
Muro de Betão Armado	0,30 %	0,50 %	0,20 %	0,30 %
Muro de Terra Armada	0,37 %	0,67 %	0,20 %	0,30 %
Muro de Gabiões	0,44 %	0,80 %	0,20 %	0,30 %

No quadro anterior é possível observar que a percentagem de deslocamento horizontal relativamente à altura do muro aumenta do Muro Ancorado para o Muro de Gabiões. O mesmo é possível ser observado para a percentagem de deslocamento vertical relativamente à altura do muro.

Como as percentagens anteriores foram baseadas nos valores propostos para os critérios de alerta e de alarme para cada tipologia de muro, os pressupostos mencionados anteriormente são aplicados igualmente nestas.

Para representação das linhas referentes aos critérios de alerta e de alarme foram desenvolvidas diversas opções, desde a adoção de uma representação que não efetuasse uma correlação entre os dois critérios, até a adoção de correlações lineares ou polinomiais (equações quadráticas e da elipse). A correlação escolhida foi a que se encontra representada nos gráficos seguintes, por se considerar ser a que melhor se ajusta.

Com a adoção de linhas retas ou curvas para a representação dos níveis de alerta e de alarme pretende-se desenvolver uma correlação entre os critérios propostos para os deslocamentos horizontais e verticais. Desta forma, caso uma estrutura apresente um deslocamento inferior, mas próximo dos níveis de alerta horizontal e vertical propostos, com este tipo de gráfico a estrutura teria atingido o nível de alerta, apesar de, individualmente, nenhum dos critérios de alerta propostos para os deslocamentos ser ultrapassado.

Um dos estudos, onde surgiu a ideia de desenvolver este tipo de representação dos critérios de alerta e de alarme para os deslocamentos, foi o realizado por Li et al. (2016).

Os gráficos seguintes apresentam os critérios de alerta e de alarme horizontais e verticais sugeridos para cada tipologia de muro. O Gráfico 32 apresenta a sugestão para representação e interpretação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Muros Ancorados.

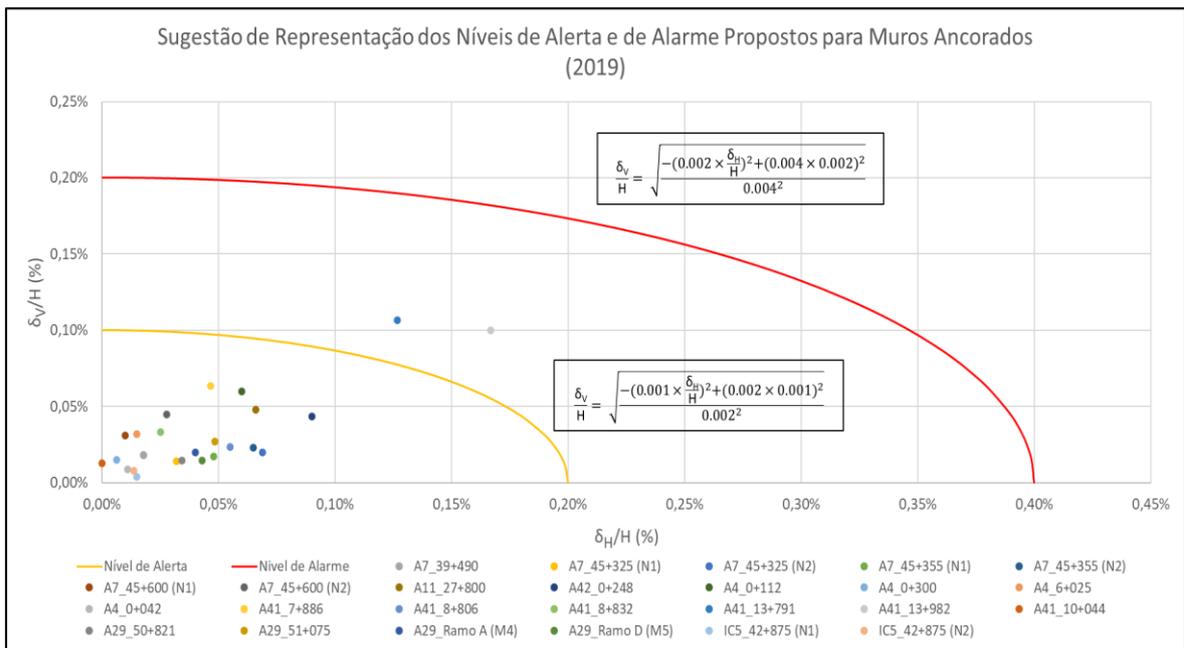


Gráfico 32. Sugestão de representação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Muros Ancorados

O Gráfico 33 apresenta a sugestão para representação e interpretação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Betão Armado.

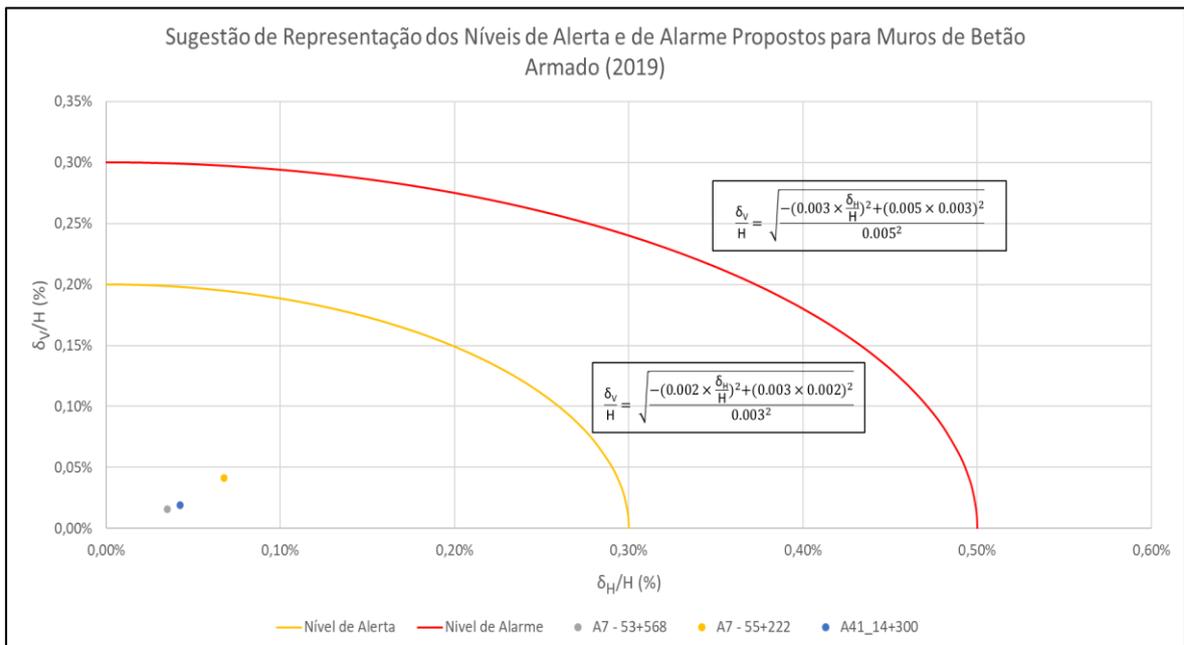


Gráfico 33. Sugestão de representação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Betão Armado

O Gráfico 34 apresenta a sugestão para representação e interpretação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Terra Armada.

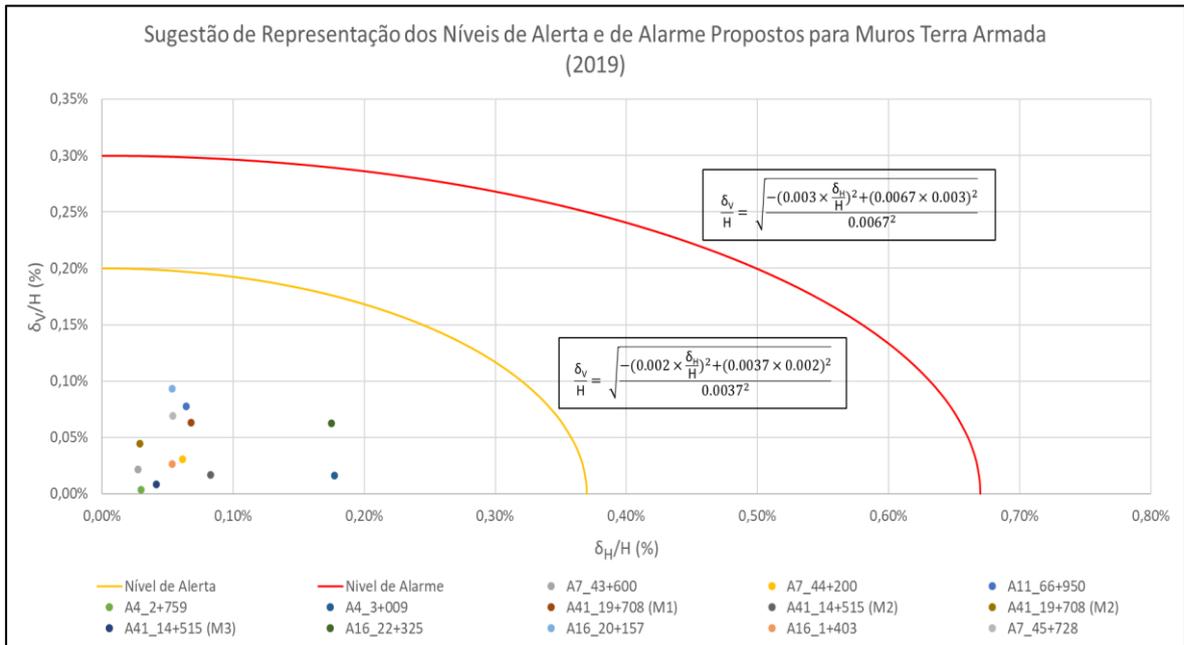


Gráfico 34. Sugestão de representação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Terra Armada

O Gráfico 35 apresenta a sugestão para representação e interpretação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Gabiões.

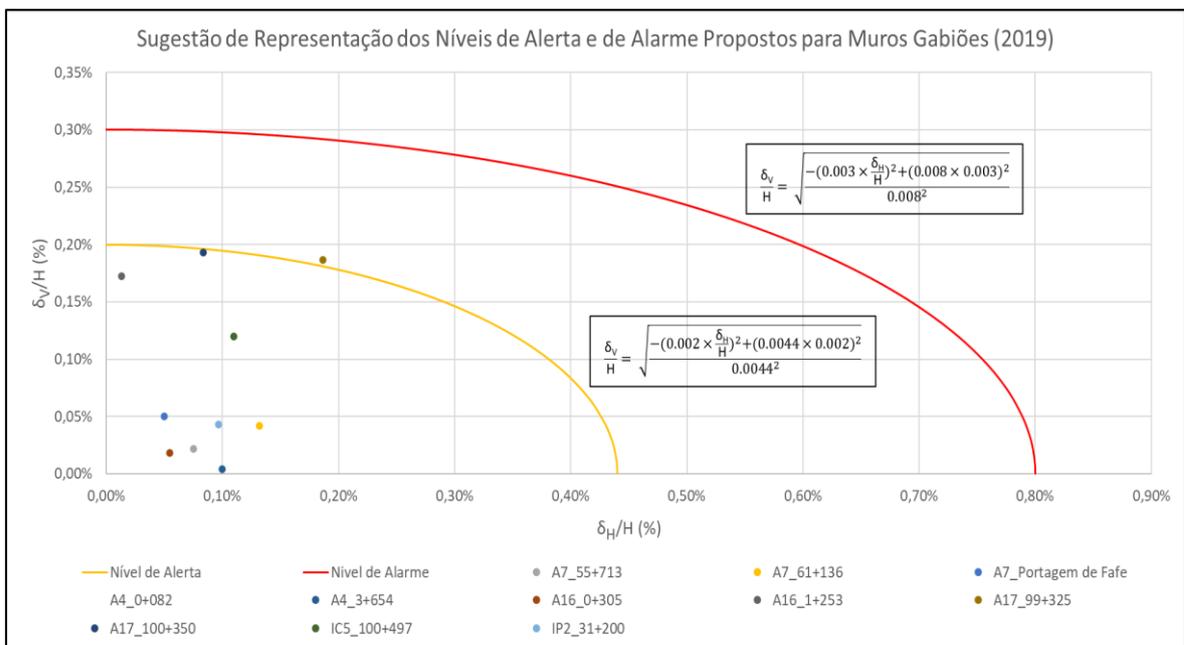


Gráfico 35. Sugestão de representação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Muros de Gabiões

O Gráfico 36 apresenta a sugestão para representação e interpretação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Taludes de Aterros.

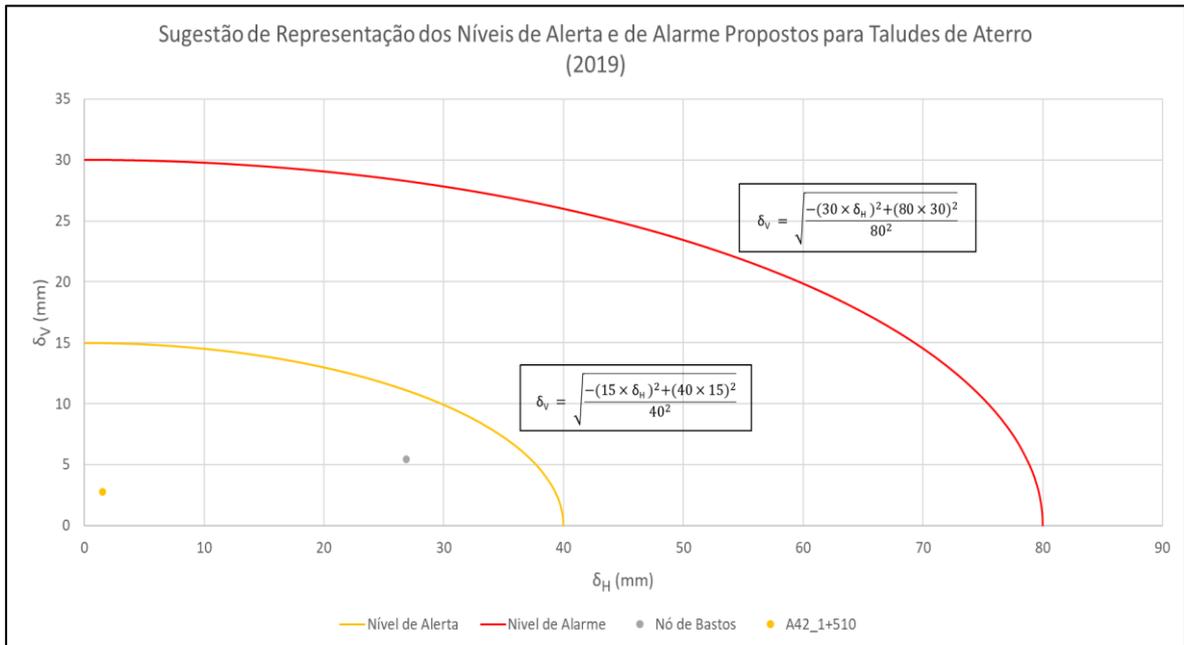


Gráfico 36. Sugestão de representação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Taludes de Aterros

O Gráfico 37 apresenta a sugestão para representação e interpretação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Taludes de Escavação.

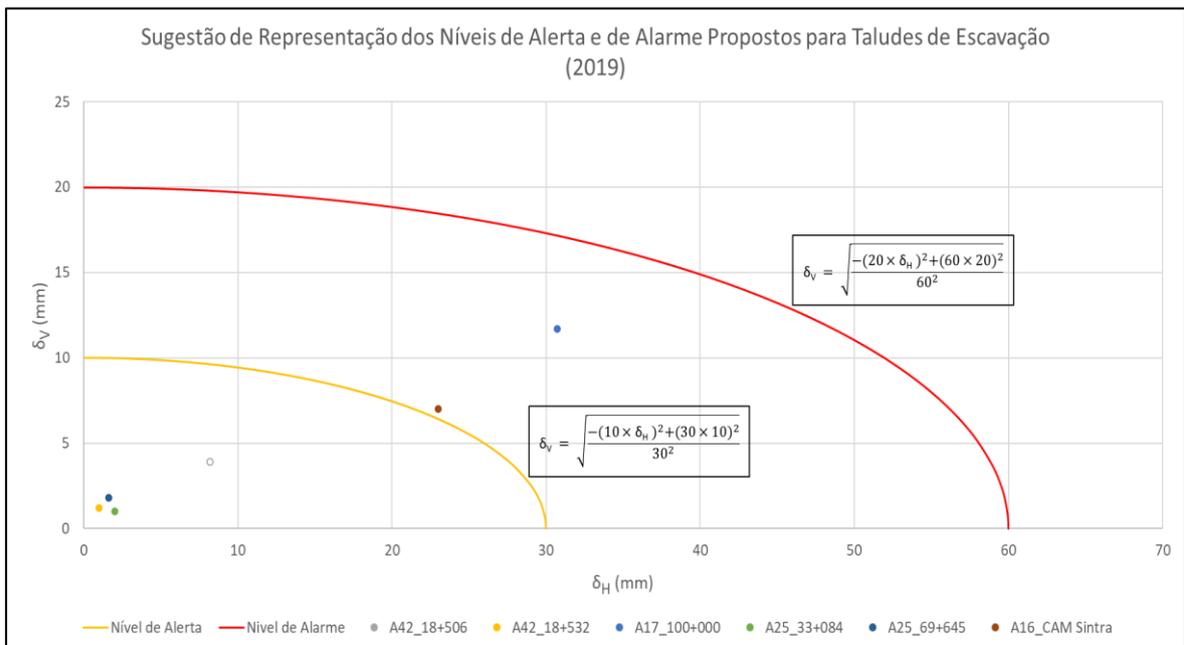


Gráfico 37. Sugestão de representação dos níveis de alerta e de alarme propostos para Taludes de Escavação

No Quadro 20 são apresentadas as equações para a representação dos critérios de alerta e de alarme presentes nos gráficos referentes a sugestão estudada.

Quadro 20. Equações para representação dos níveis de alerta e de alarme propostos

Tipo de Estrutura	Equações	
	Nível de Alerta	Nível de Alarme
Muro Ancorado	$\frac{\delta_V}{H} = \sqrt{\frac{-(0.001 \times \frac{\delta_H}{H})^2 + (0.002 \times 0.001)^2}{0.002^2}}$	$\frac{\delta_V}{H} = \sqrt{\frac{-(0.002 \times \frac{\delta_H}{H})^2 + (0.004 \times 0.002)^2}{0.004^2}}$
Muro de Betão Armado	$\frac{\delta_V}{H} = \sqrt{\frac{-(0.002 \times \frac{\delta_H}{H})^2 + (0.003 \times 0.002)^2}{0.003^2}}$	$\frac{\delta_V}{H} = \sqrt{\frac{-(0.003 \times \frac{\delta_H}{H})^2 + (0.005 \times 0.003)^2}{0.005^2}}$
Muro de Terra Armada	$\frac{\delta_V}{H} = \sqrt{\frac{-(0.002 \times \frac{\delta_H}{H})^2 + (0.0037 \times 0.002)^2}{0.0037^2}}$	$\frac{\delta_V}{H} = \sqrt{\frac{-(0.003 \times \frac{\delta_H}{H})^2 + (0.0067 \times 0.003)^2}{0.0067^2}}$
Muro de Gabiões	$\frac{\delta_V}{H} = \sqrt{\frac{-(0.002 \times \frac{\delta_H}{H})^2 + (0.0044 \times 0.002)^2}{0.0044^2}}$	$\frac{\delta_V}{H} = \sqrt{\frac{-(0.003 \times \frac{\delta_H}{H})^2 + (0.008 \times 0.003)^2}{0.008^2}}$
Taludes de Aterro	$\delta_V = \sqrt{\frac{-(15 \times \delta_H)^2 + (40 \times 15)^2}{40^2}}$	$\delta_V = \sqrt{\frac{-(30 \times \delta_H)^2 + (80 \times 30)^2}{80^2}}$
Taludes de Escavação	$\delta_V = \sqrt{\frac{-(10 \times \delta_H)^2 + (30 \times 10)^2}{30^2}}$	$\delta_V = \sqrt{\frac{-(20 \times \delta_H)^2 + (60 \times 20)^2}{60^2}}$

Pela análise dos gráficos anteriores e do quadro anterior, é possível concluir que foram adotadas para a representação dos critérios equações da elipse. Esta decisão recaiu sobre o facto de que inicialmente os níveis de alerta e de alarme propostos para os deslocamentos horizontais e verticais terem sido estudados para serem aplicados e analisados de forma individual. Tendo em conta as análises efetuadas e a experiência dos membros envolvidos neste estudo, obteve-se a conclusão de que a elipse é a equação que se revela como a mais ajustada ao critério de compatibilização dos deslocamentos em ambas as direções, tendo como base os critérios propostos para apenas uma direção. Assim os critérios sugeridos são mais conservadores quando comparados com os critérios propostos de forma individual, e em simultâneo não são demasiado restritivos quando comparados com outras soluções idealizadas para a representação destes níveis.

Analisando os gráficos sugeridos, podemos observar que os resultados obtidos, quando comparados com os gráficos apresentados com os deslocamentos horizontais e verticais individualmente, são diferentes. É possível observar que a quantidade de estruturas que se encontram em estado de alerta aumentou com a análise dos deslocamentos de forma conjunta. Esta constatação confirma que esta abordagem é mais conservadora.

No Anexo II é possível observar todos os gráficos desenvolvidos com o objetivo de estudar, analisar e definir os critérios de alerta e de alarme propostos e as diferentes sugestões desenvolvidas.

---

(página propositadamente em branco)

---

## **Capítulo V**

### **Casos de Estudo e Análise Estatística**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## 5. Casos de Estudo

No presente capítulo serão apresentados os conjuntos de muros e taludes que foram alvo do estudo para a definição dos critérios de alerta e de alarme apresentados no capítulo anterior. Estes critérios propostos serão utilizados para analisar e avaliar o comportamento destes muros e taludes ao longo da sua fase de exploração. No final deste capítulo será apresentada uma análise estatística referente a todos os muros e taludes aqui apresentados.

Para todos os muros e taludes aqui referidos, para além dos gráficos apresentados anteriormente, onde é possível ter uma visão geral do nível em que se encontram as estruturas, foram desenvolvidos ao longo do estágio fichas de monitorização individuais para todas as estruturas instrumentadas. As fichas desenvolvidas tiveram como base as fichas de leitura dos instrumentos de monitorização, fornecidas pela empresa subcontratada pela Ascendi I.G.I. e podem ser observadas no Anexo I.

Numa fase inicial, o trabalho realizado teve como objetivo principal, para além do estudo dos critérios de alerta e de alarme já apresentados, o desenvolvimento das fichas de monitorização, de forma a facilitar a análise e a interpretação dos dados fornecidos, assim como a aplicação dos critérios propostos aos dados fornecidos individualmente, para cada estrutura e instrumento de monitorização.

Como já foi referido anteriormente, as estruturas (muros e taludes) instrumentadas encontram-se distribuídas por todas as Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I. Por este motivo, existem diversas estruturas distintas entre si, pelas características das mesmas, dos diferentes processos construtivos, pelas características do terreno em que se inserem e da envolvente das estruturas.

No total, foram elaboradas as fichas de monitorização e aplicados os critérios de alerta e de alarme propostos a 73 estruturas, divididas nas diferentes tipologias apresentadas anteriormente. Na Concessão Norte encontram-se instrumentadas 18 estruturas, na Concessão do Grande Porto existem 30 estruturas instrumentadas, na Concessão da Costa de Prata existem 12 estruturas instrumentadas, a Concessão Grande Lisboa apresenta 7 estruturas instrumentadas, na Concessão Beiras Litoral e Alta encontram-se instrumentadas 2 estruturas e na Subconcessão Douro Interior existem 4 estruturas instrumentadas.

Para todas as estruturas acima enunciadas foram aplicados os níveis de alerta e de alarme propostos, mesmo para as que já tinham estes definidos em fase de projeto, com o objetivo de realizar uma comparação com estes. As diferentes estruturas encontram-se apresentadas nos seguintes subcapítulos por concessão onde se inserem.

### 5.1. Muros e Taludes presentes na Concessão Norte

Na Figura 38 são apresentados alguns dos muros e taludes que foram alvo do estudo realizado, que se encontram implantados na Concessão Norte.

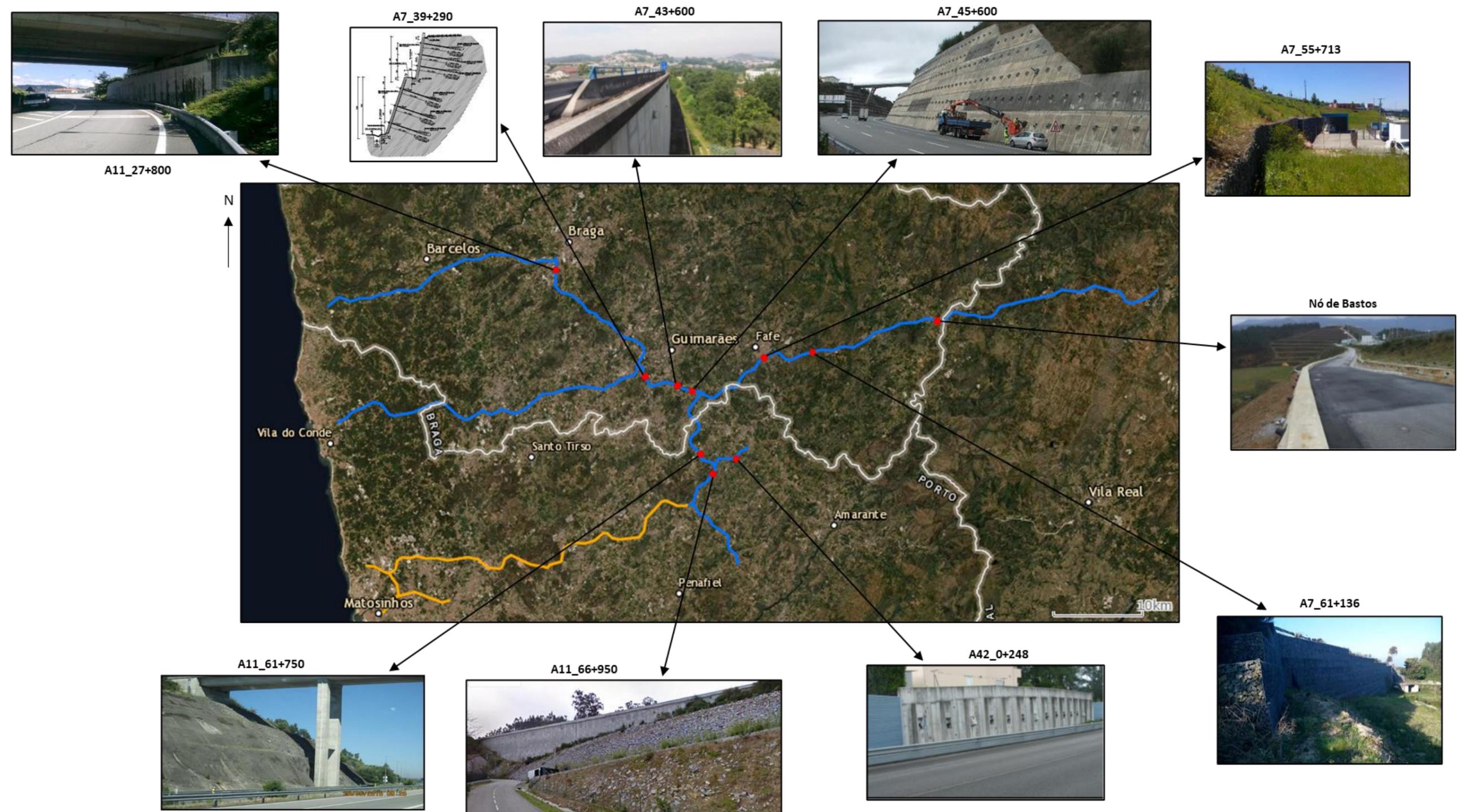


Figura 38. Muros e Taludes da Concessão Norte alvo de estudo

No Quadro 21 são apresentados todos os muros e taludes que foram alvo do estudo realizado, que se encontram implantados na Concessão Norte. Na tabela seguinte é possível observar a identificação da estrutura, a sua tipologia, a respetiva altura e os equipamentos de instrumentação que se encontram instalados nos diferentes muros e taludes.

Quadro 21. Muros e Taludes da Concessão Norte alvo de estudo

Identificação da Estrutura	Tipologia	Altura (m)	Alvos Topográficos	Células de Carga	Inclinómetros/ Piezómetros	Piezómetros
A7_39+290	Muro Ancorado	22	---	6	3	---
A7_39+490	Muro Ancorado	10	6	3	2	---
A7_45+325	Muro Ancorado	20	34	10	5	---
A7_45+355	Muro Ancorado	20	36	10	4	---
A7_45+600	Muro Ancorado	20	19	10	2	---
A7_53+568	Muro de Betão Armado	7	8	---	---	---
A7_55+222	Muro de Betão Armado	12,6	16	---	---	---
A7_43+600	Muro de Terra Armada	21	21	---	6	---
A7_44+200	Muro de Terra Armada	12,5	6	---	4	---
A7_45+728	Muro de Terra Armada	13	13	---	3	---
A7_55+713	Muro de Gabiões	12	12	---	---	---
A7_61+136	Muro de Gabiões	10	10	---	---	---
A7_Portagem de Fafe	Muro de Gabiões	7	10	---	---	---
A11_27+800	Muro Ancorado	8	10	---	---	---
A11_66+950	Muro de Terra Armada	19	29	---	---	---
A11_61+750	Talude de Escavação	35	---	2	---	---
A42_0+248	Muro Ancorado	5	3	3	---	---
Nó de Bastos	Talude de Aterro	35	66	9	8	7

## 5.2. Muros e Taludes presentes na Concessão Grande Porto

Na Figura 39 são apresentados alguns dos muros e taludes que foram alvo do estudo realizado, que se encontram implantados na Concessão Grande Porto.

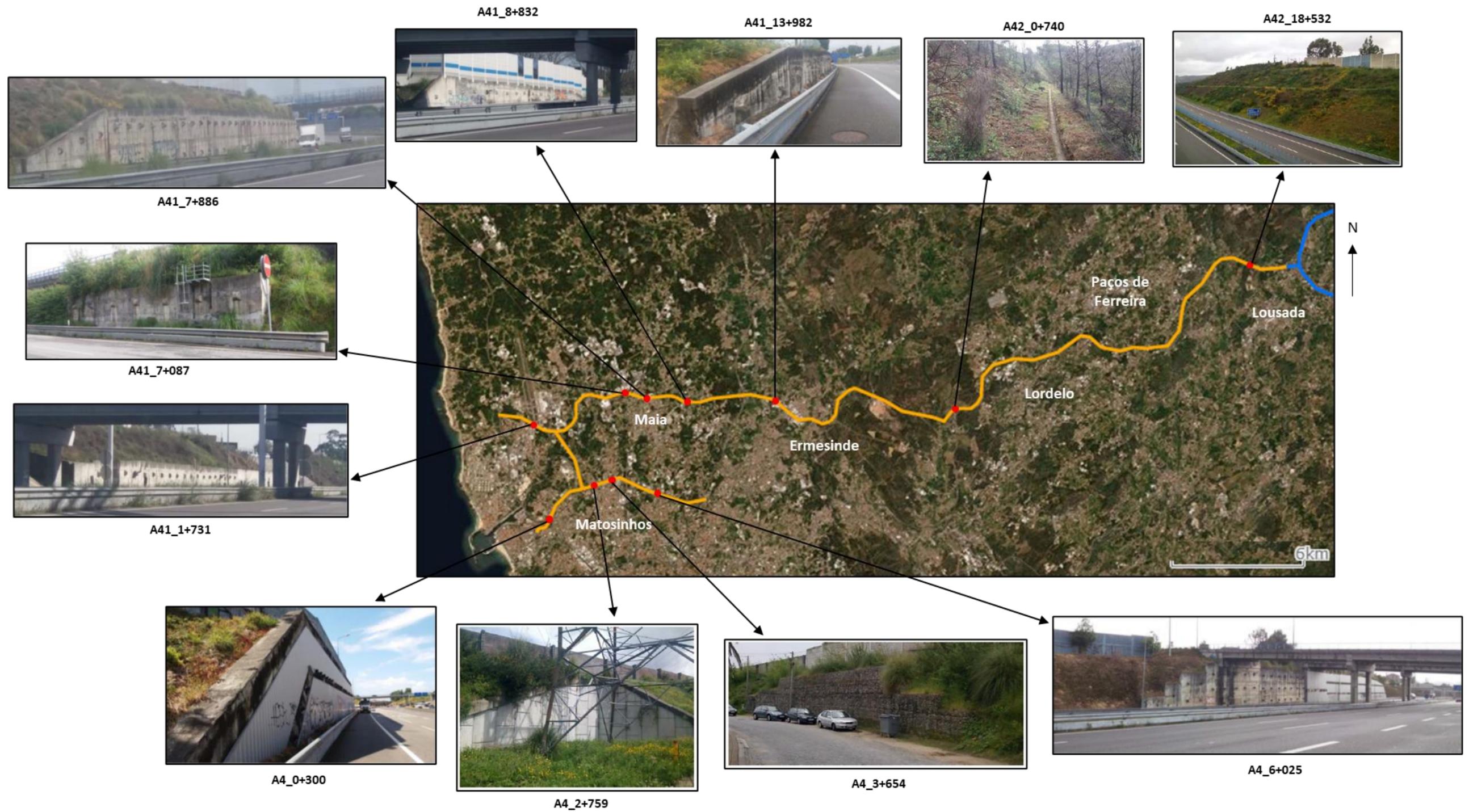


Figura 39. Muros e Taludes da Concessão Grande Porto alvo de estudo

No Quadro 22 são apresentados todos os muros e taludes que foram alvo do estudo realizado, que se encontram implantados na Concessão do Grande Porto. Na tabela seguinte é possível observar a identificação da estrutura, a sua tipologia, a respetiva altura e os equipamentos de instrumentação que se encontram instalados nos diferentes muros e taludes.

Quadro 22. Muros e Taludes da Concessão Grande Porto alvo de estudo

Identificação da Estrutura	Tipologia	Altura (m)	Alvos Topográficos	Células de Carga	Inclinómetros/ Piezómetros	Piezómetros
A4_0+112	Muro Ancorado	3	3	3	---	---
A4_0+300	Muro Ancorado	8	12	6	---	---
A4_6+025	Muro Ancorado	10	16	16	3	---
A4_0+042	Muro Ancorado	9	8	5	1	---
A4_2+715	Muro de Terra Armada	10	---	---	2	---
A4_2+759	Muro de Terra Armada	8	10	---	---	---
A4_3+009	Muro de Terra Armada	8,4	6	---	---	---
A4_3+910	Muro de Terra Armada	16,4	---	---	3	---
A4_0+082	Muro de Gabiões	11	18	---	---	---
A4_3+654	Muro de Gabiões	5	6	---	---	---
A41_1+731	Muro Ancorado	3,5	---	2	2	---
A41_7+087	Muro Ancorado	5,5	---	2	2	---
A41_7+100	Muro Ancorado	6,5	---	2	2	---
A41_7+335	Muro Ancorado	6	---	3	1	---
A41_7+387	Muro Ancorado	4,5	---	2	3	---
A41_7+886	Muro Ancorado	5,5	4	3	2	---
A41_8+806	Muro Ancorado	6	15	4	1	---
A41_8+832	Muro Ancorado	6	7	4	---	---
A41_13+791	Muro Ancorado	2,5	8	2	2	---
A41_13+982	Muro Ancorado	3	2	2	---	---
A41_10+044	Muro Ancorado	8	3	2	---	---
A41_14+300	Muro de Betão Armado	8	12	---	---	---
A41_19+708 (M1)	Muro de Terra Armada	9	20	---	---	---
A41_14+515 (M2)	Muro de Terra Armada	7	27	---	---	---
A41_19+708 (M2)	Muro de Terra Armada	9	18	---	---	---
A41_14+515 (M3)	Muro de Terra Armada	7	27	---	---	---
A42_0+740	Talude de Aterro	25	---	---	1	---
A42_1+510	Talude de Aterro	42	7	---	4	---
A42_18+506	Talude de Escavação	44	17	---	---	---
A42_18+532	Talude de Escavação	30	12	---	---	---

### 5.3. Muros e Taludes presentes na Concessão Costa de Prata

Na Figura 40 são apresentados alguns dos muros e taludes que foram alvo do estudo realizado, que se encontram implantados na Concessão Costa de Prata.

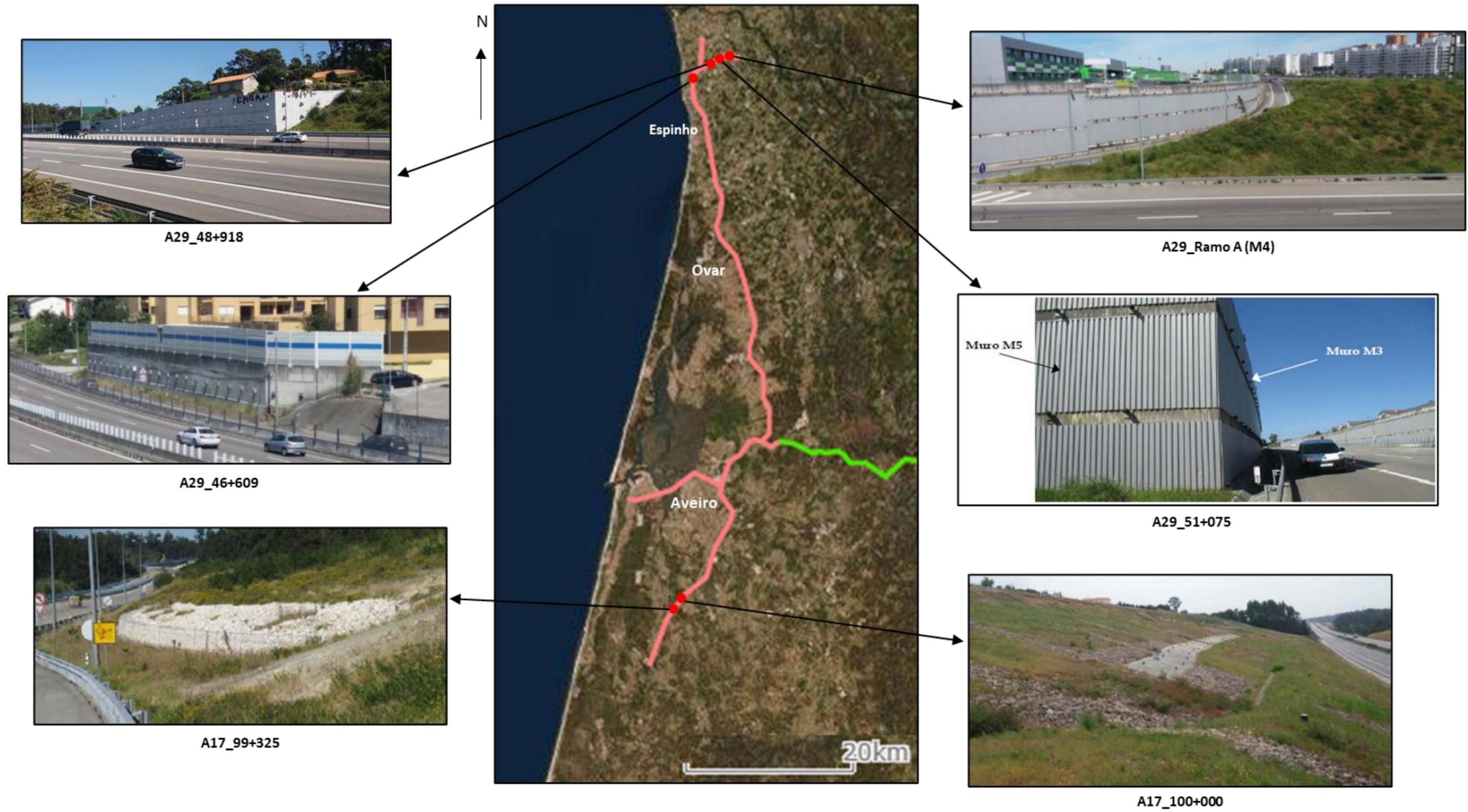


Figura 40. Muros e Taludes da Concessão Costa de Prata alvo de estudo

No Quadro 23 são apresentados todos os muros e taludes que foram alvo do estudo realizado, que se encontram implantados na Concessão Costa de Prata. Na tabela seguinte é possível observar a identificação da estrutura, a sua tipologia, a respetiva altura e os equipamentos de instrumentação que se encontram instalados nos diferentes muros e taludes.

Quadro 23. Muros e Taludes da Concessão Costa de Prata alvo de estudo

Identificação da Estrutura	Tipologia	Altura (m)	Alvos Topográficos	Células de Carga	Inclinómetros/ Piezómetros	Piezómetros
A17_99+325	Muro de Gabiões	2,5	6	---	---	---
A17_100+350	Muro de Gabiões	1	5	---	---	---
A17_100+000	Talude de Escavação	28	39	10	6	---
A29_48+918	Muro Ancorado	10	---	1	---	---
A29_50+821	Muro Ancorado	7,2	8	5	4	---
A29_46+609	Muro Ancorado	5,8	---	2	---	---
A29_51+075	Muro Ancorado	14	42	18	18	---
A29_46+943	Muro Ancorado	6,5	---	2	---	---
A29_51+109	Muro Ancorado	9,5	19	6	5	---
A29_Ramo A (M4)	Muro Ancorado	9,5	4	7	---	---
A29_Ramo D (M5)	Muro Ancorado	14	8	5	5	---
A29_Ramo D (M6)	Muro Ancorado	14	---	7	---	---

#### 5.4. Muros e Taludes presentes na Concessão Beiras Litoral e Alta

Na Figura 41 são apresentados os taludes que foram alvo do estudo realizado, que se encontram implantados na Concessão Beiras Litoral e Alta.



Figura 41. Muros e Taludes da Concessão Beiras Litoral e Alta alvo de estudo

---

No Quadro 24 são apresentados todos os taludes que foram alvo do estudo realizado, que se encontram implantados na Concessão Beiras Litoral e Alta. Na tabela seguinte é possível observar a identificação da estrutura, a sua tipologia, a respetiva altura e os equipamentos de instrumentação que se encontram instalados nos diferentes muros e taludes.

Quadro 24. Muros e Taludes da Concessão Beiras Litoral e Alta alvo de estudo

<b>Identificação da Estrutura</b>	<b>Tipologia</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Alvos Topográficos</b>	<b>Células de Carga</b>	<b>Inclinómetros/ Piezómetros</b>	<b>Piezómetros</b>
A25_33+084	Talude de Escavação	29	25	---	---	---
A25_69+645	Talude de Escavação	35,5	52	11	4	---

### 5.5. Muros e Taludes presentes na Concessão Grande Lisboa

Na Figura 42 são apresentados alguns dos muros e taludes que foram alvo do estudo realizado, que se encontram implantados na Concessão Grande Lisboa.

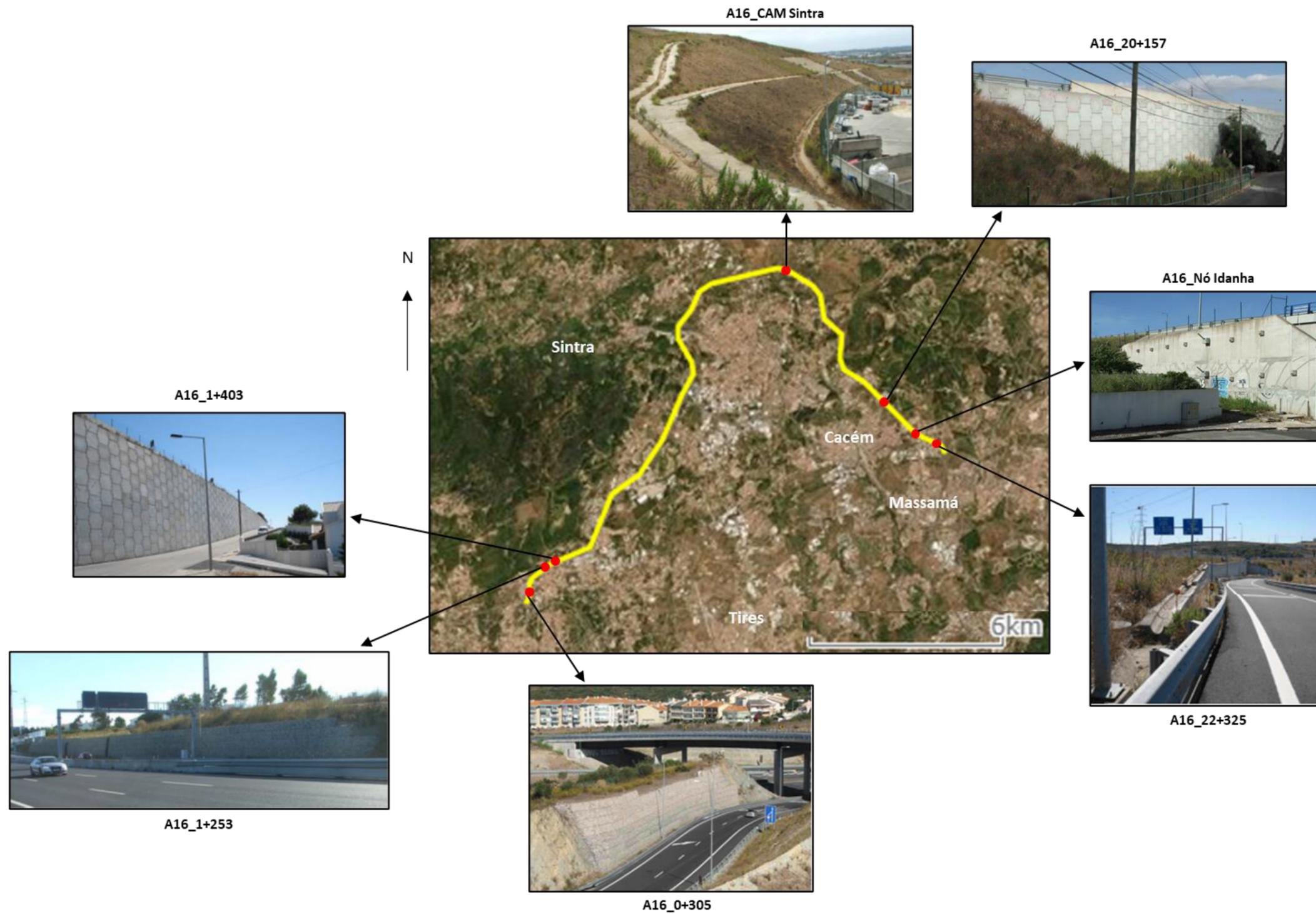


Figura 42. Muros e Taludes da Concessão Grande Lisboa alvo de estudo

No Quadro 25 são apresentados todos os muros e taludes que foram alvo do estudo realizado, que se encontram implantados na Concessão Grande Lisboa. Na tabela seguinte é possível observar a identificação da estrutura, a sua tipologia, a respetiva altura e os equipamentos de instrumentação que se encontram instalados nos diferentes muros e taludes.

Quadro 25. Muros e Taludes da Concessão Grande Lisboa alvo de estudo

Identificação da Estrutura	Tipologia	Altura (m)	Alvos Topográficos	Células de Carga	Inclinómetros/ Piezómetros	Piezómetros
A16_Nó de Idanha	Muro Ancorado	10	---	---	1	---
A16_0+305	Muro de Gabiões	10,5	15	---	---	---
A16_1+253	Muro de Gabiões	6	12	---	---	---
A16_22+325	Muro de Terra Armada	7,5	18	---	---	---
A16_20+157	Muro de Terra Armada	15	7	---	---	---
A16_1+403	Muro de Terra Armada	15	25	---	---	---
A16_CAM Sintra	Talude de Escavação	15	20	---	---	---

### 5.6. Muros e Taludes presentes na Subconcessão Douro Interior

Na Figura 43 são apresentados alguns dos muros e taludes que foram alvo do estudo realizado, que se encontram implantados na Subconcessão Douro Interior.

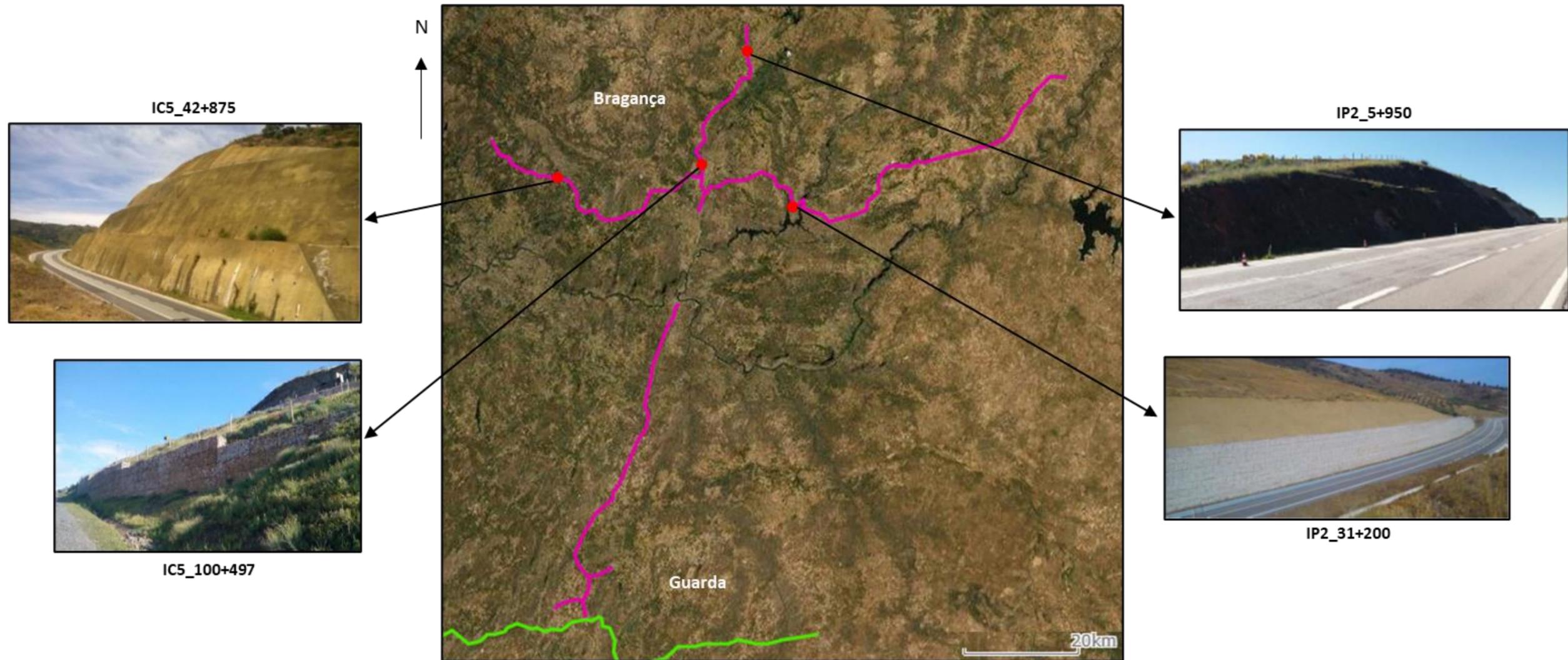


Figura 43. Muros e Taludes da Subconcessão Douro Interior alvo de estudo

No Quadro 26 são apresentados todos os muros e taludes que foram alvo do estudo realizado, que se encontram implantados na Subconcessão Douro Interior. Na tabela seguinte é possível observar a identificação da estrutura, a sua tipologia, a respetiva altura e os equipamentos de instrumentação que se encontram instalados nos diferentes muros e taludes.

Quadro 26. Muros e Taludes da Subconcessão Douro Interior alvo de estudo

Identificação da Estrutura	Tipologia	Altura (m)	Alvos Topográficos	Células de Carga	Inclinómetros/ Piezómetros	Piezómetros
IC5_42+875	Muro Ancorado	50	6	6	4	---
IC5_100+497	Muro de Gabiões	4	10	---	---	---
IP2_31+200	Muro de Gabiões	6	62	---	---	---
IP2_5+950	Talude de Escavação	---	---	---	---	2

---

### 5.7. *Análise estatística da aplicação dos Critérios de Alerta e de Alarme Propostos*

A análise estatística aqui apresentada tem como principal objetivo evidenciar o comportamento da generalidade das estruturas que foram alvo do estudo realizado e para as quais serão aplicados os critérios de alerta e de alarme propostos.

Para uma análise mais ao pormenor de cada muro e talude é fundamental recorrer às fichas de monitorização individuais, onde é possível observar como a estrutura tem evoluído em termos de deslocamentos horizontais e verticais superficiais (alvos topográficos), de aumento ou diminuição das cargas em ancoragens (células de carga), em termos de deslocamentos horizontais internos (inclinómetros) e na subida ou descida do nível piezométrico (piezómetros) ao longo da fase de exploração da estrutura. Através dos gráficos desenvolvidos e com aplicação dos níveis de alerta e de alarme, pretende-se facilitar a análise e interpretação dos dados fornecidos pelas campanhas de leitura dos instrumentos de monitorização e antecipar-se eventuais instabilizações que possam ocorrer em muros e taludes instrumentados.

De seguida, será apresentado um conjunto de gráficos, nos quais é possível observar a importância do estudo e da definição dos critérios de alerta e de alarme propostos e os resultados obtidos com a implementação dos mesmos. O Gráfico 38 representa a percentagem de estruturas, do universo estudado, que apresentam critérios de alerta e de alarme definidos de projeto.

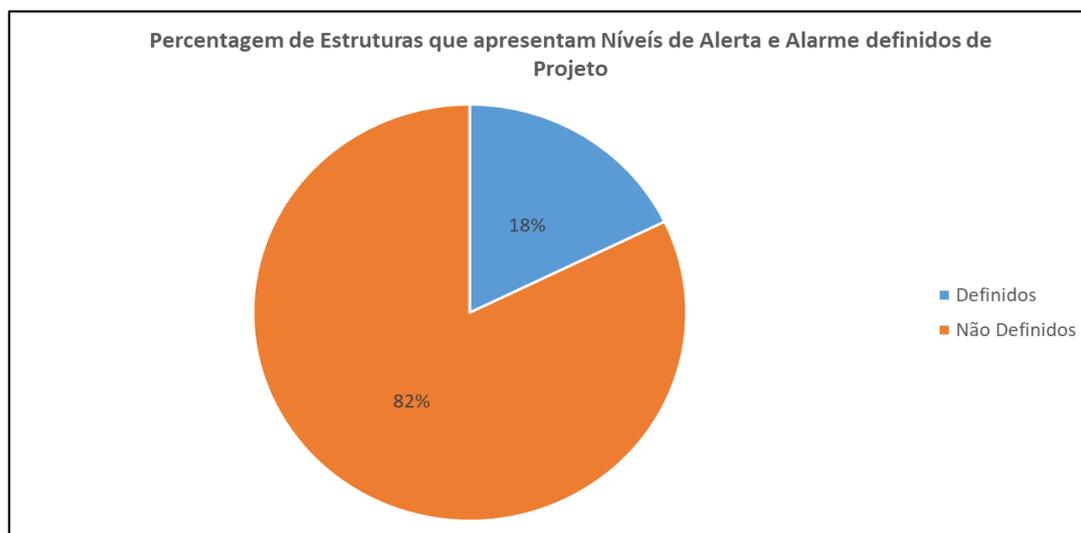


Gráfico 38. Percentagem de estruturas que apresentem níveis de alerta e de alarme definidos de projeto

Analisando o gráfico anterior é possível concluir que apenas 13 das 73 estruturas instrumentadas e estudadas, apresentam níveis de alerta e de alarme definidos de projeto para a fase de exploração. Assim, é possível observar a necessidade e a importância da definição dos critérios propostos para

as diferentes tipologias de estruturas que não apresentam estes critérios definidos, permitindo um melhor acompanhamento dos muros e taludes instrumentados ao longo da sua vida útil.

O Gráfico 39 apresenta a percentagem de estruturas que ultrapassaram os critérios de alerta e de alarme propostos para deslocamentos horizontais e vertais, observados por alvos topográficos.

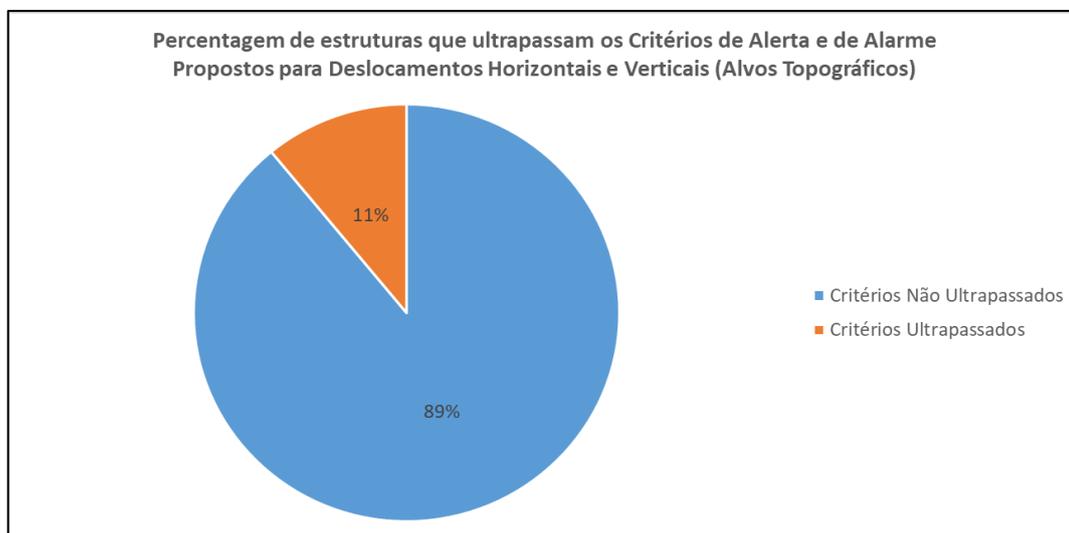


Gráfico 39. Percentagem de estruturas que ultrapassaram os critérios de alerta e de alarme propostos para deslocamentos horizontais e vertais, observados por alvos topográficos

O Gráfico 40 apresenta a percentagem de estruturas que ultrapassaram os critérios de alerta e de alarme propostos para variação de carga em ancoragens.

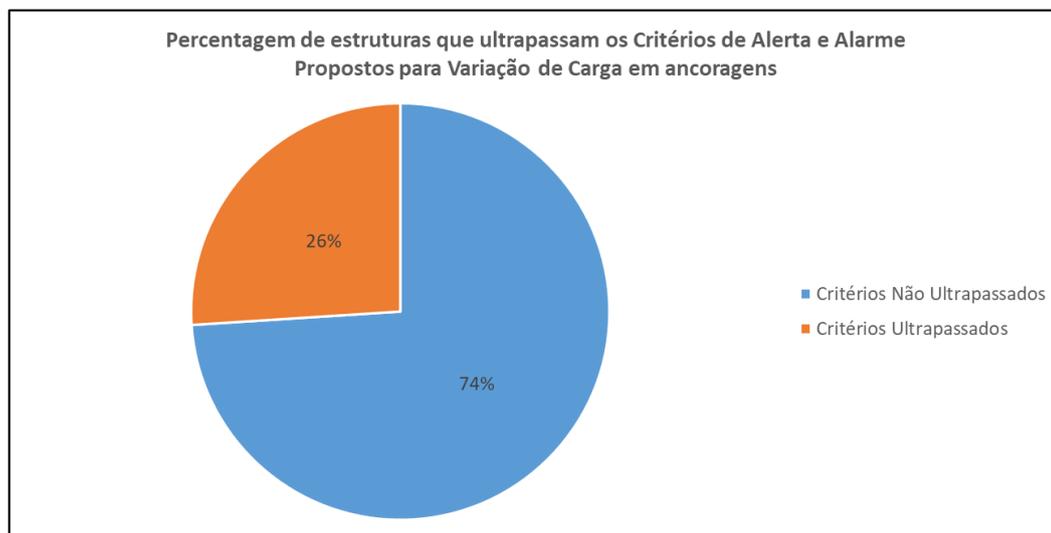


Gráfico 40. Percentagem de estruturas que ultrapassaram os critérios de alerta e de alarme propostos para variação de carga em ancoragens

O Gráfico 41 apresenta a percentagem de estruturas que ultrapassaram os critérios de alerta e de alarme propostos para deslocamentos horizontais internos, observados por inclinómetros.

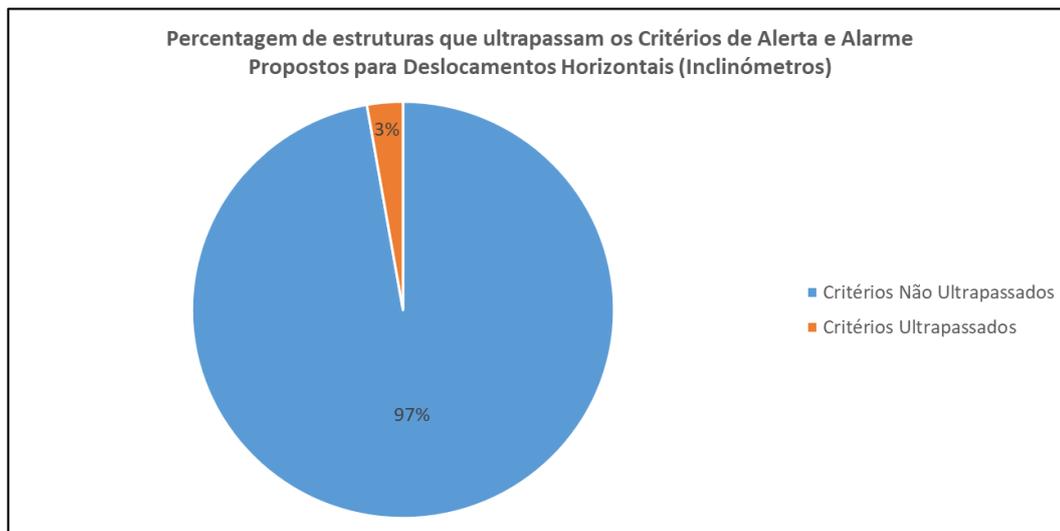


Gráfico 41. Percentagem de estruturas que ultrapassaram os critérios de alerta e de alarme propostos para deslocamentos horizontais internos, observados por inclinómetros

Analisando os gráficos anteriores e os gráficos apresentados no capítulo anterior é possível concluir que apenas uma pequena percentagem dos muros e taludes aqui analisados ultrapassam os critérios propostos. Nas 73 estruturas analisadas, 8 ultrapassam os critérios propostos para a observação das leituras recolhidas de alvos topográficos, em 19 estruturas, os dados fornecidos por células de carga ultrapassam os critérios estipulados e em 2 estruturas, os critérios definidos para inclinómetros foram ultrapassados. No Anexo III é possível observar a mesma análise para cada Concessão e Subconcessão de forma individual.

Ao longo do grupo de Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I, existe um conjunto de muros e taludes que durante a sua fase de exploração tiveram de ser intervencionadas, pois foram observados deslocamentos excessivos que colocaram em causa a segurança da estrutura. Estes deslocamentos foram detetados com a aplicação dos critérios propostos, uma vez que os deslocamentos registados ultrapassavam os níveis de alarme propostos. Atualmente, os mesmos muros e taludes encontram-se estáveis e desta forma é possível concluir que as soluções de reforço e estabilização adotadas permitiram repor a segurança das estruturas. Com a aplicação destes critérios pretende-se, principalmente, evitar situações destas, intervindo atempadamente, antes que situações de instabilidade ocorram ou evoluam, reduzindo os custos de manutenção e/ou conservação a realizar para reposição do nível adequado de segurança da estrutura.

---

## **Capítulo VI**

### **Conclusões**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## 6. Conclusões

Por todo o Mundo, aos fenómenos decorrentes de situações de instabilização de muros e taludes, encontram-se associados elevados custos, tanto a nível social e económico, como humano. Estas estruturas, quando atingem a rotura, podem afetar outras infraestruturas realizadas pelo Homem como, por exemplo, habitações, redes de abastecimento e vias de acesso, quer estejam implantadas diretamente sobre as mesmas ou na proximidade destas.

As vias rodoviárias são infraestruturas de transporte muito importantes ao nível social e económico, pelo que a instabilização de estruturas geotécnicas (muros ou taludes) pode traduzir-se em consequências muito graves em vários âmbitos. Por esse motivo, e para minimização e otimização dos custos de manutenção e conservação dos ativos, anualmente, na Ascendi I.G.I. é desenvolvido um conjunto de atividades que tem como objetivo manter o nível de serviço das infraestruturas, garantindo assim a circulação dos utentes com segurança. Este conjunto de atividades engloba a realização de inspeções visuais, a leitura dos equipamentos de monitorização instalados em muros e taludes, a manutenção vegetal e limpeza dos órgãos de drenagem.

As inspeções visuais enquadram-se no âmbito da observação de infraestruturas, cujo planeamento e periodicidade é realizado de acordo com o definido no Plano de Controlo de Qualidade, implementado no grupo de Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I. A implementação de campanhas de inspeção visual é de extrema importância durante a fase de exploração de estruturas geotécnicas, permitindo, assim, o acompanhamento da evolução do estado de manutenção e conservação das estruturas. Este conhecimento auxilia na tomada de decisões, no que diz respeito às ações de manutenção e conservação, que minimizam ou mitigam a ocorrência de incidentes com consequências maiores para a estrutura, contribuindo assim para o aumento da segurança das estruturas.

Os equipamentos de monitorização e observação que atualmente se encontram implementados no grupo de Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I. englobam a aplicação de alvos topográficos, com o objetivo de controlar deformações verticais e horizontais superficiais, a instalação de células de carga, com o objetivo de observar e controlar a variação de carga em ancoragens, a implementação de inclinómetros, com o objetivo de controlar deformações horizontais internas e a implementação de piezómetros, com o objetivo de observar a variação da posição do nível piezométrico.

Existem no mercado outros instrumentos/equipamentos de monitorização disponíveis para auscultação e monitorização de estruturas geotécnicas, que poderão vir a ser aplicados em muros e/ou taludes já existentes ou a construir, mediante uma análise prévia e individual. É também esperado que sejam implementados novos equipamentos com sistemas de aquisição e transmissão de dados automáticos, desta forma evitando a deslocação de um técnico para a recolha das leituras e posterior processamento manual. Esta solução pode revelar-se como muito vantajosa, nomeadamente ao nível da segurança, na redução do risco da deslocação do técnico ao local, no aumento do número de campanhas, na anulação da necessidade de garantia das condições climatéricas para a realização da leitura. Sendo que estes factos se concretizam numa otimização dos custos globais.

A Figura 44 sintetiza os pilares chave durante o período de exploração e o conjunto de atividades desenvolvidas ciclicamente, de acordo com o planeamento anual implementado no conjunto de Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I.

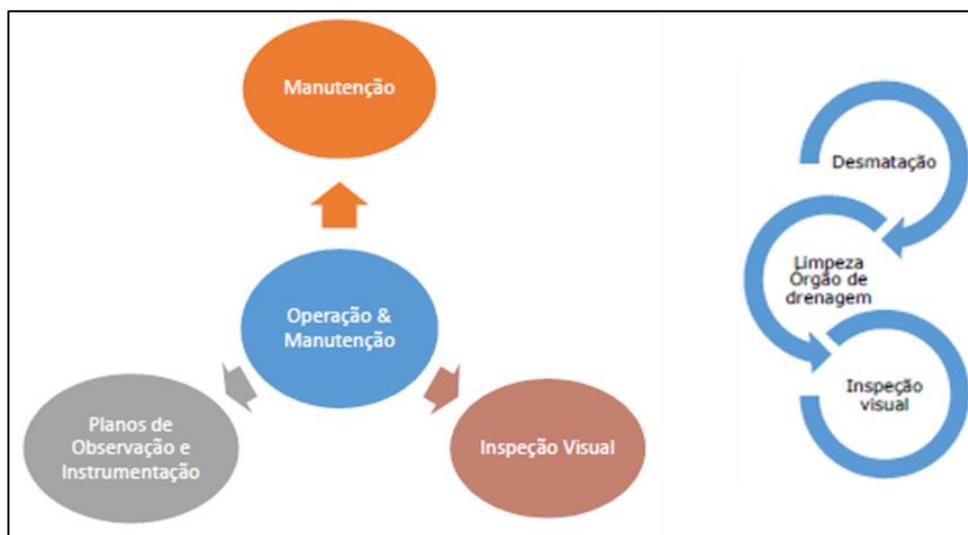


Figura 44. Pilares chave e conjunto de atividades durante o período de exploração (adaptado de Ferreira et al., 2015a)

O objetivo principal da presente dissertação, e que foi também um dos alvos principais do estágio, desenvolvido juntamente com a elaboração de fichas individuais das leituras dos equipamentos de monitorização para cada estrutura geotécnica que se encontra instrumentada, foi o estudo e a definição de um conjunto de critérios gerais de alerta e de alarme, para a fase de exploração de muros e taludes. Este objetivo surgiu duma necessidade que já se encontrava identificada na Ascendi I.G.I., que resultava da falta de definição, por parte do Plano de Instrumentação e Observação, de critérios de alerta e de alarme para um conjunto de estruturas instrumentadas.

---

Com o trabalho desenvolvido ao longo do estágio, foi possível estudar, obter e propor um conjunto de critérios de alerta e de alarme gerais para a fase de exploração das principais estruturas que são observadas na rede de autoestradas das Concessões e Subconcessões da Ascendi I.G.I., sendo elas Muros Ancorados, Muros de Betão Armado, Muros de Terra Armada, Muros de Gabiões, Taludes de Escavação e Taludes de Aterro.

Também foi desenvolvida, posteriormente, para cada estrutura geotécnica, uma sugestão para a interpretação e análise dos critérios de alerta e de alarme propostos relativa aos deslocamentos horizontais e vertais, possibilitando assim a análise dos dois deslocamentos num único gráfico e criando uma relação entre ambos os critérios. É de salientar que, com esta forma de representação, os critérios de alerta e de alarme para os deslocamentos superficiais tornam-se mais restritivos, quando comparados com os critérios propostos individualmente.

É de destacar que os critérios de alerta e de alarme propostos apenas deverão ser aplicados a estruturas geotécnicas para as quais não foram estipulados estes critérios por parte do seu Plano de Instrumentação e Observação, definidos pelo projetista da estrutura.

Ao longo do estudo realizado, estes critérios também foram aplicados a estruturas que já tinham estes critérios definidos; da comparação da aplicação dos dois, observou-se que os critérios propostos eram mais restritivos, ou seja, mais conservativos.

Dos gráficos apresentados nos dois capítulos anteriores, onde é possível ter um visão geral do nível em que se encontram as diferentes estruturas, tendo por base os diferentes critérios propostos, é importante referir que a análise não deverá ser realizada unicamente desta forma, sendo fundamental realizar e analisar a ficha de monitorização individual para cada estrutura instrumentada, onde se encontram registadas todas as leituras realizadas ao longo dos anos (histórico) para todos os instrumentos instalados, aplicando os critérios propostos.

Com a definição destes critérios de alerta e de alarme gerais, que permitem colmatar a ausência da definição destes por parte do Plano de Instrumentação e Observação para a fase de exploração, e com a realização de uma sugestão para a sua interpretação e análise, que correlaciona os deslocamentos horizontais e verticais num único gráfico, os principais objetivos da presente dissertação e do estágio foram cumpridos.

---

Atualmente, todas as estruturas instrumentadas já apresentam novas fichas de monitorização individuais, que foram realizadas com o objetivo de facilitar a análise e a interpretação das leituras realizadas, e os critérios de alerta e de alarme propostos já se encontram devidamente aplicados em todas as fichas, tendo em conta as características de cada estrutura.

As novas campanhas anuais serão vertidas nas fichas de monitorização, atualizando-as com os novos dados fornecidos pela leitura dos equipamentos de monitorização instalados e, desta forma, será possível acompanhar e avaliar o comportamento da estrutura, desde a primeira leitura realizada até as leituras mais recentes, sendo assim possível analisar toda a fase de exploração da estrutura e observar a sua evolução ao longo dos anos.

Neste momento, os critérios de alerta e de alarme propostos encontram-se corretamente aplicados nas respetivas estruturas e estão numa fase de avaliação.

Estes critérios propostos e as sugestões realizadas poderão sofrer futuras alterações, caso seja observada essa necessidade, e com o aumento da experiência na sua aplicação em estruturas com diferentes características, os valores aplicados para o cálculo dos critérios das diferentes estruturas podem vir a ser ajustados.

Relativamente à análise estatística realizada e aos gráficos desenvolvidos podem ser retiradas as seguintes conclusões:

- 82% das estruturas instrumentadas não apresentavam critérios de alerta e de alarme definidos;
- 11% das estruturas ultrapassaram os critérios propostos aplicados às leituras realizadas por alvos topográficos;
- 26% das estruturas ultrapassaram os critérios propostos aplicados às leituras realizadas por células de carga;
- 3% das estruturas ultrapassaram os critérios propostos aplicados às leituras realizadas por inclinómetros;

Da análise dos mesmos, é possível observar que o maior problema foi detetado nas leituras resultantes do equipamento células de carga. Em todas as estruturas onde os critérios propostos foram ultrapassados, será monitorizado o comportamento e a evolução, assim como, estudadas medidas adequadas.

---

No passado foram detetados comportamentos que revelavam situações de instabilização ou anomalias em muros e taludes, nestes casos a Ascendi I.G.I. realizou um acompanhamento muito próximo dessas situações e uma intervenção rápida, promovendo ações de reparação e de estabilização das estruturas afetadas. Atualmente, as mesmas estruturas encontram-se estáveis, desta forma é possível concluir que as soluções de reforço e estabilização adotadas permitiram repor a segurança das estruturas e foram eficazes.

Como perspetivas futuras, poderá vir a ser modelado numericamente, com recurso a um programa de cálculo automático, um conjunto de estruturas, de diferentes tipologias, para as quais os critérios de alerta e de alarme foram propostos. Este trabalho terá como principal objetivo consolidar os critérios de alerta e de alarme propostos e as sugestões realizadas para a correlação entre os deslocamentos horizontais e verticais.

Associando aos níveis de alerta e de alarme fatores de segurança, será possível constatar, com auxílio de um *software* desenvolvido para esse fim, se os valores de deslocamento definidos pelos critérios de alerta e de alarme propostos são similares aos deslocamentos obtidos pela modelação numérica para os fatores de segurança associados.

Por exemplo, ao nível de alerta poderá ser associado um fator de segurança de 1,5, uma vez que geralmente a valores superiores a este correspondem estruturas que se encontram numa situação estável. Ao nível de alarme poderá ser associado um fator de segurança próximo de 1,0, correspondendo a estruturas que se encontram em situações marginalmente estáveis. Assim a fatores de segurança superiores de 1,5 corresponderá o nível estável, fatores de segurança entre um valor próximo de 1,0 e 1,5 corresponderá o nível de alerta e fatores de segurança inferiores a um valor próximo de 1,0 corresponderá o nível de alarme.

A associação também poderá ser feita fazendo corresponder o estado limite último ao nível de alarme e um estado limite de utilização ao nível de alarme.

Devido ao enquadramento atual, alguns dos planos inicialmente definidos para a presente dissertação e ao longo da mesma, tiveram de ser alterados ou mesmo cancelados, por diversos motivos correlacionados à situação pandémica que vivemos e que coincidiram com grande parte do período de estágio. Contudo o objetivo principal da presente dissertação e do estágio desenvolvido na Ascendi I.G.I. foi concluído.

---

(página propositadamente em branco)

---

## **Capítulo VII**

### **Referências bibliográficas**

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## 7. Referências bibliográficas

Aires-Barros, L. (1991). Alteração e alterabilidade de rochas. Instituto Nacional de Investigação Científica, INIC, Lisboa, 384 pp.

ASCENDI (2019). Catálogo de Patologia. ASCENDI, 60 pp. (Relatório Inédito).

Barreto, P., Silva, L., & Sarmiento, A. (2018). A importância da caracterização de estabilidade na gestão de estruturas geotécnicas. [[http://www.crp.pt/docs/A54S222-9CRP\\_Artigo\\_111.pdf](http://www.crp.pt/docs/A54S222-9CRP_Artigo_111.pdf)] (consultado em abril 2020)

Borges, R.O., Fazan, A.J., Sobral, L.T., Ribeiro, R.F., Lanza, D.S. (2017). Utilização de drones de pequeno porte como alternativa de baixo custo para caracterização topográfica da infraestrutura de transportes no Brasil. In: Actas do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro, Brasil [[http://www.cartografia.org.br/cbc/trabalhos/4/635/CT04-138\\_1506813983.pdf](http://www.cartografia.org.br/cbc/trabalhos/4/635/CT04-138_1506813983.pdf)] (consultado em abril 2020)

Bromhead, E.N. (2019). The stability of slopes. 2nd Edition. CRC Press, 424 p.

Bruch, A.F., Angélica, C. (2019). Avaliação da acurácia das cubagens de volumes de mineração através de levantamentos convencionais e fotogramétricos. Revista Brasileira de Geografia Física, 1:283–298.

Budetta, P. (2004). Assessment of rock fall risk along roads. Natural Hazards and Earth System Sciences, 4:71–81.

Cabral, A.P. (2013). Método observacional numa contenção de taludes na Praia dos Pescadores, Ericeira. FCT-UNL, Lisboa (dissertação de Mestrado) [<https://run.unl.pt/handle/10362/11013>]

Calcaterra, D., Parise, M. (2010). Weathering as a predisposing factor to slope movements: An introduction. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 23: 1-4 [<https://doi.org/10.1144/EGSP23.1>]

Calvello, M. (2017). Early warning strategies to cope with landslide risk. Rivista Italiana Di Geotecnica, 51(2):63–91.

Carlà, T., Intrieri, E., Di Traglia, F., Nolesini, T., Gigli, G., Casagli, N. (2017). Guidelines on the use of inverse velocity method as a tool for setting alarm thresholds and forecasting landslides and structure collapses. Landslides, 14:517–534.

Carrasco, F.M.V. (2015). Reabilitação de taludes de aterro em encostas: análise de um caso numa ferrovia em Odemira. FCT-UNL, Lisboa (dissertação de Mestrado) [[https://run.unl.pt/bitstream/10362/14758/1/Carrasco\\_2014.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/14758/1/Carrasco_2014.pdf)]

Carvalho, P.A.S., Freitas, C., Wolle, C., Gama, G., Barros, J. et al. (1991). Manual de Geotecnia: Taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas. IPT, São Paulo [<https://repositorio.usp.br/item/000821712>]

---

Casagli, N., Frodella, W., Morelli, S., Tofani, V., Ciampalini, A., Intrieri, E., Raspini, F., Rossi, G., Tanteri, L., Lu, P. (2017). Spaceborne, UAV and ground-based remote sensing techniques for landslide mapping, monitoring and early warning. *Geoenvironmental Disasters*, 4: 9.

Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Ramos, L., Pinheiro, R. (2015). Scanline sampling techniques for rock engineering surveys: insights from intrinsic geologic variability and uncertainty. In: Giordan D., Thuro K., Carranza-Torres C., Wu F., Marinos P., Delgado C. (eds.), *Engineering Geology for Society and Territory – Applied Geology for Major Engineering Projects*, IAEG, Springer, 6:357-361.

Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Silva, R.S., Monteiro, R., Teixeira, J., Moreira, P., Meixedo, J.P., Trigo, J.F. (2010b). Da teoria à prática em geotecnia urbana de maciços rochosos: o exemplo da zona ribeirinha de Gaia. *Tecnologia e Vida, Revista da Secção Regional do Norte da ANET, Porto*, 6:39-45.

Chaminé, H.I., Afonso, M.J., Silva, R.S., Moreira, P.F., Teixeira, J., Trigo, J.F., Monteiro, R., Fernandes, P., Pizarro, S. (2010a). Geotechnical factors affecting rock slope stability in Gaia riverside (NW Portugal). In: Williams A.L., Pinches G.M., Chin C.Y., McMorran T.J. & Massey C.I. (eds.) *Proceedings of the 11th Congress of the International Association for Engineering Geology, IAEG'2010, Geologically Active, Auckland, New Zealand*. CRC Press: Taylor & Francis Group. p. 2729-2736.

Chen, M., Jiang, Q. (2020). An early warning system integrating time-of-failure analysis and alert procedure for slope failures. *Engineering Geology*, 272:105629.

Coelho, P. (2010). Projecto e observação de obras geotécnicas: soluções de estabilização de taludes acomodando infraestruturas em exploração. IST e Academia Militar, Lisboa. (Dissertação de mestrado) [file:///C:/Users/Gil/AppData/Local/Temp/Disserta%25E7%25E3o%2520(Aluno%252054033).pdf]

Coimbra, L. (2019). Uma perspetiva operacional sobre a aplicação de inclinómetros no âmbito da geotecnia. ISEP, Porto. (Dissertação de mestrado) [<https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/14770>]

Costa, E.A. (2005). Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes. UFRGS, Porto Alegre [<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/6150/000481611.pdf?sequence=1>]

Cruden, D., Varnes, D.J. (1996). Landslide types and processes. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides: investigation and mitigation*. National Academy Press, Washington D.C., 247:36–75. [<https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/pdf/fs2004-3072.pdf>]

de Graaf, P., Wessels, S. (2013). Slope monitoring and data visualisation state-of-the-art: advancing to Rio Tinto Iron Ore's Mine of the Future™. In: P.M. Dight (ed.), *Proceedings of the 2013 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 803-814 [[https://doi.org/10.36487/ACG\\_rep/1308\\_55\\_deGraaf](https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1308_55_deGraaf)]

Dinis da Gama, C. (1991). Qualidade e patologia de obras geotécnicas. In: 4º Congresso Nacional de Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa, 3: 1-20.

---

Dixon, N.; Codeglia, D.; Smith, A.; Fowmes, G.; Meldrum, Ph. (2015). An acoustic emission slope displacement rate sensor: case studies. In: Dight P.M. (ed.), FMGM 2015, Loughborough University. Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 743-756 [<https://hdl.handle.net/2134/19021>]

Duarte, S. (2017). Investigações geotécnicas em taludes rochosos : o caso da escarpa de S. Cristóvão. ISEP, Porto (Dissertação de Mestrado) [<https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/10274>]

Dunnicliff, J. (1982). Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. Wiley, 608 p.

Earth Retaining Structures (2017). Earth Retaining Structures Vol. V (p. 82). [<https://www.virginiadot.org/business/resources/bridge/Manuals/Part11/Chapter10.pdf>]

Eberhardt, E., Stead, D., Morrison, T. [Eds.] (2007). Rock mechanics meeting society's challenges and demands. In: Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, 27-31 May 2007, CRC Press [<https://www.taylorfrancis.com/books/9780429107566>]

Espinha Marques, J., Afonso, M.J., Teixeira, J., Chaminé, H.I., Marques, J.M., Samper, J., Pisani, B., Duarte, J. (2016). Estudo da condutividade hidráulica na zona não saturada através do permeâmetro de Guelph: importância da sua aplicação em hidrogeologia, hidropedologia, hidromorfologia e hidrogeotecnia. In: H.I. Chaminé, M.J. Afonso, A.C. Galiza (eds.), Eduardo Gomes (1931-2008): Engenheiro, Docente, Empreendedor - Uma Homenagem. Coleção LABCARGA-Geo|2, Laboratório de Cartografia e Geologia Aplicada & Departamento de Engenharia Geotécnica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. p. 99 – 111.

Fernandes, J. (2017). Metodologias de abordagem de cenários de instabilidade geotécnica: Casos de estudo. ISEP, Porto (dissertação de mestrado) [<https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/11716>]

Ferreira, A., Neves, A., Sanches, S. (2015a). Inspeção visual de muros e taludes (p. 12).

Ferreira, A., Neves, A., Sanches, S. (2015b). Sustims – muros & taludes. In: 9º Congresso Rodoviário Português, pp. 1–10. [[http://crp.pt/docs/A54S222-9CRP\\_Artigo\\_147.pdf](http://crp.pt/docs/A54S222-9CRP_Artigo_147.pdf)]

Ferreira, A., Varela, P., Neves, A., Sanches, S., Pinto, A., Fernandes, E.M. (2020). Muros e taludes: manual de observação e auscultação de infraestruturas geotécnicas. Versão Julho 2020. ASCENDI (Relatório inédito).

Giordan, D., Adams, Marc S., Aicardi, I., et al. (2020). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. Bull. Eng. Geol. Environ., 79:3437–3481.

González de Vallejo, L.I. (2010). Design with geo-hazards: an integrated approach from engineering geological methods. Soils and Rocks, Int. J. Geot. Geoenviron. Eng., 31(1):1–28.

González de Vallejo, L.I., Ferrer M. (2011). Geological engineering. CRC Press, Taylor-Francis group, 725 pp.

Gusmão Filho, J. (2006). Desempenho de obras geotécnicas. Editora Universitária UFPE.

---

Haberler-Weber, M., Eichhorn, A., Kahmen, H., Theilen-Willige, B. (2009). Concept of a multi-scale monitoring and evaluation system for landslide disaster prediction. In: Sideris M.G. (eds), *Observing our Changing Earth*. International Association of Geodesy Symposia, vol. 133. Springer, Berlin, Heidelberg.

Hack, R. (2002). An evaluation of slope stability classification. In: Dinis da Gama C., Sousa L.R. (eds.), *Eurock'2002*, ISRM, Funchal, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, pp. 3–32.

Haryanto, W. (2019). A realtime geotechnical monitoring system in telemetry basis for some critical slopes. In: *Proceedings of SLOPE 2019*.

Highland, L.M., Bobrowsky, P. (2008). *The landslide handbook: A guide to understanding landslides*. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 129 p.

Hoek, E. (2007). *Practical rock engineering*. RocScience: Hoek's Corner, 342 p.

Hoek, E., Bray, J.W. (1981). *Rock slope engineering*. Revised third edition. Institute of Mining and Metallurgy, London, 354 p.

Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11:167–194.

ICES et al. (2017). Client guide to instrumentation and monitoring definition. Chartered Institution of Civil Engineering Surveyors, Institution of Civil Engineers, Royal Institution of Chartered Surveyors and The Survey Association, 28 p. [<https://www.cices.org/content/uploads/2013/05/Client-Guide-to-Instrumentation-and-Monitoring.pdf>]

Intrieri, E., Gigli, G., Mugnai, F., Fanti, R., Casagli, N. (2012). Design and implementation of a landslide early warning system. *Engineering Geology*, 147–148:124–136.

Kane, W.F., Beck, T.J. (2000). Instrumentation practice for slope monitoring. [<http://www.civil.northwestern.edu/people/dowding/tdr/publications/ipfsm.pdf>] (consultado em abril 2020).

Li, X.Y., Zhang, L.M., Jiang, S.H., Li, D.Q., Zhou, C.B. (2016). Assessment of slope stability in the monitoring parameter space. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(7): [<file:///C:/Users/Gil/AppData/Local/Temp/Assessmentofslopestabilityinthemonitoringparameterspace.pdf>]

Lienhart, W., Monsberger, C. M., Kalenjuk, S., Woschitz, H. (2018). High resolution monitoring of retaining walls with distributed fibre optic sensors and mobile mapping systems. *Proceedings of the 7th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, APWSHM 2018*, D, 79–87.

Lucas, J.L. (2016). Soluções de estabilização de taludes junto a plataformas ferroviárias Caso de estudo: Estabilização de taludes na Linha do Oeste. IST, Lisboa (Dissertação de Mestrado). [<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/departamentos/decivil/dissertacao/1691203502342569>]

Marques, L. (2007). Monitorização estática e dinâmica: aplicações. Universidade do Minho, Guimarães (Dissertação de mestrado) [<https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/17458>]

---

Martins, L. (2018). Potencialidades do campo experimental em lavra de minas da FEUP. FEUP, Porto (Dissertação de mestrado) [[https://sigarra.up.pt/feup/pt/pub\\_geral.pub\\_view?pi\\_pub\\_base\\_id=278402](https://sigarra.up.pt/feup/pt/pub_geral.pub_view?pi_pub_base_id=278402)]

Matos Fernandes, M. (2006). Mecânica dos Solos – Conceitos e Princípios Fundamentais. 2ª edição, FEUP edições, Porto. Volume 1. 463 pp.

Matos Fernandes, M. (2011). Mecânica dos Solos – Introdução à Engenharia Geotécnica. FEUP edições, Porto. Volume 2.

Mattos, K.C.A. (2009). Processo de instabilização em taludes rodoviários em solos residuais arenosos: estudo na Rodovia Castello Branco (SP 280), Km 305 a 313. USP, São Carlos, Brasil (Dissertação de Mestrado) [<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-23032010-102600/publico/dissertacao.pdf>]

Mendonça, A. (1997). Um estudo sobre aterros ferroviários antigos. FEUP, Porto (Dissertação de Mestrado) [file:///C:/Users/Gil/AppData/Local/Temp/Texto%20integral.pdf]

Mendonça, A. (2019). Apontamentos de reforço e contenção de terrenos. Instituto Superior de Engenharia do Porto. (Policopiado)

MotaEngil. (2017). Relatório de Instrumentação - Concessão Beira Litoral e Alta (p. 80). (Relatório Inédito).

MotaEngil. (2017). Relatório de Instrumentação - Concessão Costa de Prata (p. 120). (Relatório Inédito).

MotaEngil. (2017). Relatório de Instrumentação - Concessão Grande Lisboa (p. 90). (Relatório Inédito).

MotaEngil. (2017). Relatório de Instrumentação - Concessão Grande Porto (p. 150). (Relatório Inédito).

MotaEngil. (2017). Relatório de Instrumentação - Concessão Norte (p. 116). (Relatório Inédito).

MotaEngil. (2017). Relatório de Instrumentação - Subconcessão Douro Interior (p. 90). (Relatório Inédito).

MotaEngil. (2019). Relatório de Instrumentação - Concessão Beira Litoral e Alta (p. 50). (Relatório Inédito).

MotaEngil. (2019). Relatório de Instrumentação - Concessão Costa de Prata (p. 90). (Relatório Inédito).

MotaEngil. (2019). Relatório de Instrumentação - Concessão Grande Lisboa (p. 60). (Relatório Inédito).

MotaEngil. (2019). Relatório de Instrumentação - Concessão Grande Porto (p. 120). (Relatório Inédito).

MotaEngil. (2019). Relatório de Instrumentação - Concessão Norte (p. 86). (Relatório Inédito).

MotaEngil. (2019). Relatório de Instrumentação - Subconcessão Douro Interior (p. 60). (Relatório Inédito).

Nagalli, A., Fiori, A.P., Nagalli, B. (2011). Método para aplicação de escâner a laser terrestre ao estudo da estabilidade de taludes em rocha. Revista Brasileira de Geociências, 41(1):56–67.

---

Neves, M. (2015). Numerical analysis of slope failure in granitic soil slopes Main types of instability and remediation measures. UBI, Covilhã (Tese de Doutoramento) [file:///C:/Users/Gil/AppData/Local/Temp/Phd%20Thesis%20Manuel%20Neves.pdf]

NP EN 1997-1 2010 - Norma Portuguesa - Eurocódigo 7 – Projecto geotécnico Parte 1: Regras gerais. (2010). 179 pp.

Oliveira, N. (2010). Soluções para a estabilização de taludes em linhas férreas. FEUP, Porto (Dissertação de mestardo) [https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/61468/1/000148289.pdf]

Ortigão, J.R., Justi, M.G., D’Orsi, R., Brito, H. (2001). Rio-Watch 2001: the Rio de Janeiro landslide alarm system. In: Proceedings 14th Southeast Asian Geotechnical Conference, 3:237–241.

Pinheiro, M., Sanches, S., Miranda, T., Neves, A., Tinoco, J., Ferreira, A., Correia, A.G. (2015). A new empirical system for rock slope stability analysis in exploitation stage. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 76:182–191.

Pinheiro, M., Sanches, S., Miranda, T., Neves, A., Tinoco, J., Ferreira, A., Gomes Correia, A. (2014). Sistema de avaliação de qualidade de taludes rochosos em fase de exploração. In: Actas do 14º Congresso Nacional de Geotecnia - Geotecnia nas Infraestruturas (14CNG), Covilhã. [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/31142/1/Artigo1\_\_Indices\_submiss%C3%A3o\_MP.pdf]

Raposo, E.M.S. (2011). Observação de deslocamentos em obras geotécnicas. FCT-UNL, Lisboa (dissertação de mestrado) [https://run.unl.pt/handle/10362/7855]

Reeves, B., Noon, D., Stickle, G., Longstaff, D. (2005). Slope monitoring system. [https://patents.google.com/patent/US6850183B2/sv]

Rocha, S. (2014). Instrumentação e monitorização de estruturas geotécnicas na rede ferroviária nacional – estudo de caso do talude de aterro entre os Km’s 236+450 e 236+720 da Linha do Sul. ISEL, Lisboa (dissertação de mestrado) [https://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/3914]

Rodrigues, C.F.G. (2011). Monitorização de estruturas de engenharia civil apoiada em soluções de fibra óptica. FEUP, Porto (tese de doutoramento) [https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/65646]

Sabatini, P.J., Elias, V., Schmertmann, R., Bonaparte, R. (1997). Geotechnical engineering circular no. 2: earth retaining systems. Federal Highway Administration, Report: FHWA-SA-96-038.

Sandersen, F., Bakkehoi, S., Hestnes, E., Lied, K. (1996). The influence of meteorological factors on the initiation of debris flows, rockfalls, rockslides and rockmass stability. In: Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Landslides, 1:97–114.

Santos, A. (2017). A importância da geotecnia na infraestrutura ferroviária. ISEL, Lisboa (dissertação de mestrado) [https://repositorio.ipl.pt/handle/10400.21/8850]

---

Siebenmann, R., Yu, H.T., Bachus, R. (2015). UCIMS: Advances in geotechnical construction and performance monitoring. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7: 207–212.

Silva, A.A. (2015). Monitorização remota de estruturas geotécnicas. In: 9º Congresso Rodoviário Português, pp. 1–7. [[http://www.crp.pt/docs/A48S171-8\\_CRP\\_T5\\_161.pdf](http://www.crp.pt/docs/A48S171-8_CRP_T5_161.pdf)]

Silva, R. (2012). Aplicação da engenharia natural na estabilização de taludes. Universidade da Madeira, Funchal (dissertação de mestrado) [<https://digituma.uma.pt/handle/10400.13/535>]

Slob, S., Hack, H.R., Feng, Q., Röshoff, K., Turner, A.K. (2007). Fracture mapping using 3D laser scanning techniques. In: L. Ribeiro e Sousa; C. Olalla; N. Grossmann (Eds.), *Proceedings of the 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Lisbon. Taylor & Francis, London, pp. 299-302.

Slope Indicator (2004). Guide to geotechnical instrumentation. Durham Geo Slope Indicator, Washington, USA, 52 pp. [<http://www.durhamgeo.com/pdf/documents/course%20material/guide-to-instrumentation.pdf>] (consultado em abril 2020)

Sousa, P. (2014). Implementação de um plano de observações nos taludes da VICEG (Via de Cintura Externa da Guarda), junto à rotunda do G. IPG, Guarda (Relatório de Projeto Curricular).

Terzaghi, R.D., 1965. Sources of errors in joint surveys. *Géotechnique*, 15: 287–304.

Tinoco, J., Sanches, S., Miranda, T., Neves, A., Pinheiro, M., Ferreira, A., Gomes Correia. (2014). Uso de cadeias de Markov na previsão da degradação de taludes. In: Actas do 14º Congresso Nacional de Geotecnia - Geotecnia nas Infraestruturas (14CNG), Covilhã. [<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/31141>]

Torres, J. (2010). Métodos de observação durante a execução de obras subterrâneas. ISEP, Porto (dissertação de mestrado) [<https://recipp.ipp.pt/handle/10400.22/2063>]

Trigo, J.F., Pacheco, C., Fernandes, J., Ferraz, P., Sousa, J., Machado, R., Duarte, S., Mendes, A., Freitas, L., Teixeira, J., Ramos, L., Afonso, M.J., Chaminé, H.I. (2020). Geotechnical hazards in rocky slopes (Northern Portugal): focused on methodology. In: F. Fernandes, A. Malheiro, H.I. Chaminé (eds.), *Advances in Natural Hazards and Hydrological Risks: Meeting the Challenge, Proceedings of the 2nd International Workshop on Natural Hazards (NATHAZ'19), Pico Island—Azores 2019*, Springer, pp. 69-73.

UDCO – Urban Development Control Office (2006). Retaining wall: quick inspection guide. Urban Development Control Office City Planning Division & Ministry of Land [<https://www.yumpu.com/en/document/view/11439769/retaining-wall-quick-inspection-guide-iisee-international->] (consultado em abril 2020)

Wyllie, D.C. (2014). *Rock fall engineering*. CRC Press, 270 p.

Wyllie, D.C., Mah, C.W. (2004). *Rock slope engineering: civil and mining*. 4th Edition. Spon Press, London and New York, 431 p.

---

### **Sites da Internet consultados**

**Geobruqq.** In: <https://www.geobruqq.com/> (consultado em abril de 2020)

**MACCAFERRI.** In: <https://www.maccaferri.com/> (consultado em abril de 2020)

**CoMMetro.** In: <http://www.commetro.com.br/> (consultado em abril de 2020)

**SES – Survery & Safety.** In: <http://survey-safety.blogspot.com/> (consultado em abril de 2020)

**NEOTEK.** In: <https://www.neotek.gr/> (consultado em abril de 2020)

**MRA Instrumentação.** In: <http://www.mra.pt/> (consultado em maio de 2020)

**VMA.** In: <https://www.vmasismo.com.br/> (consultado em maio de 2020)

**GeoSensori.** In: <https://www.geosensori.com.br/> (consultado em maio de 2020)

**DGSI – Durham Geo Slope Indicator.** In: <https://durhamgeo.com/> (consultado em maio de 2020)

**ANAC – Autoridade Nacional da Aviação Civil.** In: <https://www.anac.pt/> (consultado em maio de 2020)

**SISGEO.** In: <https://www.sisgeo.com/> (consultado em maio de 2020)

**ENCARDIO RITE.** In: <https://www.encardio.com/> (consultado em maio de 2020)

**Leica Geosystems.** In: <https://leica-geosystems.com/> (consultado em junho de 2020)

---

**Anexos**  
(Consultar DVD-Rom)

---

---

(página propositadamente em branco)

---

## **Anexos**

Os anexos podem ser consultados em DVD-Rom.

Anexo 1 – Fichas de monitorização.

Anexo 2 – Critérios de alerta e de alarme propostos e sugestões para sua interpretação.

Anexo 3 – Análise estatística.