

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELO BURAS

**APLICAÇÃO DE SENSORES DISTRIBUÍDOS DE FIBRA ÓPTICA EM UM
MODELO EXPERIMENTAL PARA MONITORAMENTO DE MOVIMENTOS DE
MASSA**

CURITIBA

2013

MARCELO BURAS

**APLICAÇÃO DE SENSORES DISTRIBUÍDOS DE FIBRA ÓPTICA EM UM
MODELO EXPERIMENTAL PARA MONITORAMENTO DE MOVIMENTOS DE
MASSA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do grau de Mestre em Construção Civil

Orientador: Alessandro Christopher
Morales Kormann

Co-orientador: Rodrigo Moraes da Silveira

CURITIBA

2013

B845a	<p>Buras, Marcelo</p> <p>Aplicação de sensores distribuídos de fibra óptica em um modelo experimental para monitoramento de movimentos de massa / Marcelo Buras. – Curitiba, 2013.</p> <p>160f. : il. [algumas color.] ; 30 cm.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, 2013.</p> <p>Orientador: Alessandro Christopher Morales Kormann.-- Co-orientador: Rodrigo Moraes da Silveira.</p> <p>Bibliografia: p. 156-160.</p> <p>1.Movimentos de Massa (Solo). 2.Fibra óptica. I. Universidade Federal do Paraná. II. Kormann, Alessandro Christopher Morales. III. Silveira, Rodrigo Moraes da. IV. Título.</p> <p>CDD: 551.307</p>
-------	---

TERMO DE APROVAÇÃO

MARCELO BURAS

APLICAÇÃO DE SENSORES DISTRIBUÍDOS DE FIBRA ÓPTICA EM UM MODELO EXPERIMENTAL PARA MONITORAMENTO DE MOVIMENTOS DE MASSA

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Alessander Christopher Morales Kormann (Orientador – Doutorado USP-SP)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR.

Co-orientador:

Dr. Rodrigo Moraes da Silveira (Coorientador – Doutorado UFRGS)
LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.

Examinadores:

Prof. Dr. Sidnei Helder Cardoso Teixeira (Doutorado USP- São Carlos)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da UFPR.

Prof. Dr. Luiz Russo Neto (Doutorado USP – São Carlos)
Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

Curitiba, 28 de maio de 2013.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que direta ou indiretamente participaram do desenvolvimento desta pesquisa e que sempre transmitiram pensamentos positivos ao longo desta jornada de muitos trabalhos e também de muitas alegrias.

Em primeiro lugar agradeço a Deus, a quem pertence tudo que sou e tenho, pela saúde e por guiar meus caminhos ao longo de todos os anos.

A minha família, em especial minha mãe Elane Maria Moura Campos, meus avós José Campos de Moura e Maria do Carmo Moura Luz por sempre me incentivarem a seguir em frente em busca dos meus ideais. A você que meu deu a vida e a vocês que me ensinaram a vivê-la com dignidade, não basta dizer muito obrigado. Amo vocês, esta conquista é nossa.

A Karina Rocha pelo apoio, incentivo, compreensão, amor e carinho. Você também foi responsável por esta conquista. Grande parte do desenvolvimento descrito neste trabalho foi idealizado com você ao meu lado.

Ao orientador, Alessandro Christopher Morales Kormann, pelos ensinamentos e incentivos desde o tempo de graduação. Certamente o seu conhecimento inspira muitos em seguir em frente.

Ao co-orientador, Rodrigo Moraes da Silveira, que muito mais do que orientar a pesquisa, orientou a maneira de pensar. Na convivência do dia-a-dia tornou-se um grande amigo que levo para vida toda. Você com certeza foi a peça fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Laboratório de Materiais e Estruturas (LAME) do Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento (LACTEC), onde toda a pesquisa foi desenvolvida, em especial ao Luiz Alkimin de Lacerda e ao Paulo Roberto Chamceki, pela oportunidade e confiança.

Aos funcionários do LAME, Valdevan Santos e Jacke Hains Muniz de Souza, pelas ideias, esforços, construção e execução dos ensaios. Sem a ajuda de vocês este trabalho não teria sido desenvolvido com a mesma ênfase.

As bolsistas Fabiana Martins da Silveira, Jessica Sudoviski e Andressa Knopp, pela execução dos ensaios.

Ao Rafael Petronilho de Oliveira Rocha, pelo conhecimento e ensinamentos com a utilização da tecnologia de fibra óptica.

Ao Sr. Nelson Cheraconski, pelas usinagens dos elementos de ancoragens do cabo de fibra óptica e suas incansáveis visitas ao LAME quando surgiam novas ideias para fabricação destes elementos.

A Petrobras pelo apoio financeiro. Este trabalho é apenas parte de uma pesquisa que vem sendo desenvolvida pelo LACTEC desde 2008.

RESUMO

Deslocamentos no solo podem causar danos à infra-estrutura de edificações, dutos ou rodovias, principalmente em áreas susceptíveis a ocorrência de movimento de massa. A construção de estruturas de contenção ou mesmo a paralisação da obra em andamento em uma área de risco de deslizamento pode ser necessária para providenciar a segurança local. Neste contexto, é de fundamental importância identificar a presença de potenciais movimentações do solo, assim como a abrangência de zonas instáveis. Nesta dissertação foi desenvolvido um sistema de identificação de áreas de movimento de massa através da tecnologia de fibra óptica com utilização do método distribuído de temperatura e deformação (DTSS). Para a identificação de áreas instáveis ou zona de transição entre uma massa de solo estável e uma massa de solo em movimento, foram desenvolvidos experimentos específicos para simular estes movimentos em laboratório. Nestes experimentos, a zona instável ou zona de transição é identificada através da deformação de um cabo sensor de fibra óptica que é instalado no solo. Para que o cabo de fibra óptica possa sofrer os mesmos movimentos que o solo, foram idealizados sistemas de ancoragem para o cabo denominados Elementos de Ancoragem de Cabos de Fibra Óptica (EDAF). Os resultados dos experimentos realizados em laboratório possibilitaram a estimativa de um modelo teórico eficaz, a partir da interpretação de um comportamento gráfico, resultado de uma simulação de movimento de massa, onde seja possível a identificação de zonas de transição entre áreas estáveis e instáveis de uma determinada encosta.

Palavras Chave: Elementos de Ancoragem, Fibra óptica, Movimentos de massa.

ABSTRACT

Soil displacements can cause serious problems to the buildings infrastructure, pipelines or highways, especially in areas susceptible to the occurrence of mass movement. The construction of containing structures or even the stoppage of the construction in progress in the risk of mass movement area, could be required to provide the local security. In this context, it is importance identify the presence of the potential soil movements, as well as the comprisement of the unstable area. In this thesis it was developed an identifying system of mass movement area using fiber optic technology (Distributed Temperature and Strain Method - DTSS). For the identification of the unstable areas or transition zone between the stable soil mass and unstable soil mass, special experiments have been developed to simulate the soil movements in the laboratory. In the experiments, the unstable zone or transition zone is identified by the strain of a fiber optical sensor cable that is installed in the soil. For the fiber optic cable register the same soil movements, it was designed a system of anchor for optical cables called Anchor Elements for Fiber Optic Cables (EDAF). The results of the experiments developed in the laboratory made it possible to estimate an efficacious theoretical model for the behavior interpretation graph of the mass movements, where it is possible to identify areas or transition zones between stable and unstable areas of any slope.

Key Words: Anchoring Elements, Fiber Optical, Mass Movements.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações.....	IX
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO GERAL	13
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	14
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 HISTÓRICO DA INSTRUMENTAÇÃO.....	17
2.2 CRITÉRIOS DE INSTRUMENTAÇÃO	21
2.3 INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA PARA MONITORAMENTO DE MOVIMENTOS DE MASSA.....	24
2.3.1 Medidores de deslocamentos de superfície.....	24
2.3.1.1 <i>Marcos topográficos</i>	24
2.3.1.2 <i>GPS (Global Positioning System – Sistema de Posicionamento Global)</i>	28
2.3.1.3 <i>Eletróníveis</i>	30
2.3.2 Medidores de deslocamentos de subsuperfície	32
2.3.2.1 <i>Medidor hidrostático de recalque (caixa sueca)</i>	33

2.3.2.2	<i>Medidor de recalque de hastes tipo KM</i>	36
2.3.2.3	<i>Medidor de recalque telescópico IPT</i>	38
2.3.2.4	<i>Medidor magnético de recalque (Idel)</i>	41
2.3.2.5	<i>Inclinômetros</i>	43
2.3.2.6	<i>Fita de cisalhamento</i>	49
2.4	TECNOLOGIA DE FIBRA ÓPTICA	51
2.4.1	A fibra óptica – Generalidades	52
2.4.1.1	<i>Fibra óptica monomodo</i>	54
2.4.1.2	<i>Fibra óptica multimodo</i>	55
2.4.2	Princípios físicos da tecnologia de fibra óptica	55
2.4.3	Conexões de fibra óptica	57
2.4.3.1	<i>Decapagem e clivagem</i>	58
2.4.3.2	<i>Emendas ou fusão</i>	60
2.4.3.3	<i>Conectores</i>	61
2.4.3.4	<i>Pigtails</i>	62
2.4.3.5	<i>Utilização de conectores ou de emendas por fusão</i>	63
2.4.4	Classificação dos sensores de fibra óptica	63
2.4.5	O sistema DTSS – <i>Brillouin</i>	65
2.4.6	Monitoramento geotécnico com a utilização da tecnologia de fibra óptica pelo método distribuído	67
2.4.7	Vantagens e limitações da tecnologia de fibra óptica	73

3	METODOLOGIA DA PESQUISA	76
3.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	76
3.1.1	Perfil metálico em formato de “U”	77
3.1.2	Caixa de cisalhamento	79
3.1.3	Cabo de fibra óptica	82
3.1.4	Âncora	83
3.1.5	Solo arenoso	87
3.1.6	Unidade leitora DTSS	88
3.2	PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS	88
3.2.1	Caracterização do solo arenoso	89
3.2.2	Procedimentos prévios aos testes com fibra óptica	92
3.2.3	Verificação dos elementos de ancoragem de fibra óptica	93
3.2.4	Teste de arrancamento	95
3.2.5	Simulação da zona de cisalhamento	98
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	103
4.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO ARENOSO	103
4.2	CALIBRAÇÃO DA CHUVA DE AREIA	105
4.3	VERIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS DE ANCORAGEM DO CABO DE FIBRA ÓPTICA	106
4.4	TESTES DE ARRANCAMENTO	114
4.4.1	Comparação entre os testes de arrancamento	129

4.5	SIMULAÇÃO DA ZONA DE CISALHAMENTO	134
4.5.1	Comparação entre os resultados para simulação da zona de cisalhamento	145
5	CONCLUSÃO.....	149
5.1	Sistemas desenvolvidos para avaliação do desempenho do cabo de fibra óptica	149
5.2	Elementos de ancoragem do cabo de fibra óptica (EDAF)	151
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	153
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1. GRANDEZAS FÍSICAS MEDIDAS (ADAPTADO DE LEE, 2003).....	12
FIGURA 1.2. TECNOLOGIA EMPREGADA PARA MEDIR GRANDEZAS FÍSICAS (ADAPTADO DE LEE, 2003)	12
FIGURA 1.3. MODELO CONCEITUAL PARA SIMULAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE MOVIMENTO	14
FIGURA 2.1. O PRIMEIRO PIEZÔMETRO	18
FIGURA 2.2. O PRIMEIRO INCLINÔMETRO	18
FIGURA 2.3. ESTAÇÃO TOPOGRÁFICA INSTALADA EM UM <i>BENCHMARK</i> (LEICA GEOSYSTEMS)	26
FIGURA 2.4. PRISMA DE MONITORAMENTO - <i>REFERENCE MONUMENT</i> (LEICA GEOSYSTEMS)	26
FIGURA 2.5. DETALHE DE PROJETO DE UM TIPO DE MARCO SUPERFICIAL.....	28
FIGURA 2.6. MARCO SUPERFICIAL.....	28
FIGURA 2.7. PRINCÍPIO DO FUNCIONAMENTO DO ELETRÔNÍVEL.....	31
FIGURA 2.8. ELETRÔNÍVEL E UNIDADE LEITORA (AFFONSO, 2004)	32
FIGURA 2.9. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MEDIDOR HIDROSTÁTICO DE RECALQUE (OLIVEIRA E SAYÃO, 2004).....	34
FIGURA 2.10. MEDIDOR DE RECALQUES TIPO KM (CRUZ, 2004)	36
FIGURA 2.11. MEDIDOR DE RECALQUES TIPO KM (SILVERIA, 2006).....	38
FIGURA 2.12. MEDIDOR DE RECALQUE TELESCÓPICO (CRUZ, 2004)	39
FIGURA 2.13. MEDIDOR DE RECALQUES TIPO <i>IPT</i> (CRUZ, 2004).....	41
FIGURA 2.14. MEDIDOR MAGNÉTICO DE RECALQUE (CRUZ, 2004)	42
FIGURA 2.15. TORPEDO DE INCLINÔMETRO, BOBINA COM CABO E UNIDADE LEITORA (HTTP://WWW.GEOKON.COM).....	43
FIGURA 2.16. TUBO-GUIA DE INCLINÔMETRO (HTTP://WWW.GEOKON.COM).....	44
FIGURA 2.17. SEQUÊNCIA DE INSTALAÇÃO DO TUBO-GUIA	45

FIGURA 2.18. ESQUEMA MOVIMENTAÇÃO DO TORPEDO NO TUBO-GUIA.....	46
FIGURA 2.19. ÂNGULO DE INCLINAÇÃO E DESVIO LATERAL (CATÁLOGO SINCO)	48
FIGURA 2.20. RESULTADO GRÁFICO DE INCLINÔMETRIA (FONTE: GEOKON)	49
FIGURA 2.21. PRINCÍPIOS DE INSTALAÇÃO E FUNCIONAMENTO DAS FITAS DE CISCALHAMENTO (SILVEIRA, 2006)	50
FIGURA 2.22. FIBRA ÓPTICA	52
FIGURA 2.23. DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DA FIBRA (FREUDENRICH, 2009).....	53
FIGURA 2.24. FIBRA ÓPTICA MONOMODO	54
FIGURA 2.25. FIBRA ÓPTICA MULTIMODO.....	55
FIGURA 2.26. EXEMPLO DE REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ (SANTOS, 1999).....	56
FIGURA 2.27. PROPAGAÇÃO DA LUZ NA FIBRA ÓPTICA (SANTO, 1999).....	57
FIGURA 2.28. EQUIPAMENTOS PARA FUSÃO DE FIBRAS ÓPTICAS.....	58
FIGURA 2.29. ALICATE PARA REMOÇÃO DO REVESTIMENTO PRIMÁRIO DA FIBRA ÓPTICA ...	58
FIGURA 2.30. REVESTIMENTO PRIMÁRIO DA FIBRA ÓPTICA	59
FIGURA 2.31. EQUIPAMENTO DE CORTE DE FIBRAS ÓPTICAS EM ÂNGULOS DE 90° (CLIVADOR).....	60
FIGURA 2.32. EQUIPAMENTO DE FUSÃO DE FIBRAS ÓPTICAS.....	60
FIGURA 2.33. DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO MECÂNICA APÓS FUSÃO	61
FIGURA 2.34. TIPOS DE CONECTORES DE FIBRA ÓPTICA (ITEN, 2011)	62
FIGURA 2.35. PIGTAILS	63
FIGURA 2.36. SISTEMA DTSS DA SENSORNET	65
FIGURA 2.37. ESPECTRO DA LUZ ESPALHADA EM UMA FIBRA ÓPTICA	66
FIGURA 2.38. VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE BRILLOUIN COM TEMPERATURA E DEFORMAÇÃO (ADAPTADO DE KLUTH, 2012)	66
FIGURA 2.39. CONFIGURAÇÃO DA FIBRA PARA DETECAÇÃO DE MOVIMENTOS DE SUPERFÍCIE (HOEPFFNER ET AL., 2008).	68

FIGURA 2.40. CONFIGURAÇÃO DA FIBRA PARA DETECÇÃO DE MOVIMENTOS DE SUBSUPERFÍCIES (HOEPFFNER <i>ET AL.</i> , 2008).....	69
FIGURA 2.41. MICRO-ÂNCORA (PURZIN <i>ET AL.</i> 2010).....	69
FIGURA 2.42. REPRESENTAÇÃO DO MOVIMENTO UTILIZADO NOS TESTE DE LABORATÓRIO (PURZIN <i>ET AL.</i> 2010).....	70
FIGURA 2.43. RESULTADOS GRÁFICOS DA EFICIÊNCIA (PURZIN <i>ET AL.</i> 2010)	70
FIGURA 2.44. DETERMINAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA COM UTILIZAÇÃO DE FIBRA ÓPTICA (ROCHA, 2011).....	71
FIGURA 2.45. REPRENSETAÇÃO DO SISTEMA MNA-FO (SOUZA, 2012)	72
FIGURA 3.1. MODELO CONCEITUAL PARA SIMULAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE MOVIMENTO	76
FIGURA 3.2. SEÇÃO TRANSVERSAL DO PERFIL METÁLICO	77
FIGURA 3.3. SISTEMA DE TRACIONAMENTO DO CABO DE FIBRA ÓPTICA (PONTO FIXO 1)	78
FIGURA 3.4. SISTEMA DE ANCORAGEM DO CABO DE FIBRA ÓPTICA (PONTO FIXO 2).....	78
FIGURA 3.5. VISÃO TRIDIMENSIONAL DA CAIXA DE CISALHAMENTO	79
FIGURA 3.6. PRENSA DE COMPRESSÃO AXIAL ADAPTADA PARA O ENSAIO.....	80
FIGURA 3.7. CAIXA DE CISALHAMENTO – POSIÇÃO INICIAL DO ENSAIO	81
FIGURA 3.8. CAIXA DE CISALHAMENTO – POSIÇÃO FINAL DO ENSAIO	81
FIGURA 3.9. CAIXA DE CISALHAMENTO	82
FIGURA 3.10. CABO DE FIBRA ÓPTICA.....	83
FIGURA 3.11. SISTEMA DE ANCORAGEM DO CABO DE FIBRA ÓPTICA	84
FIGURA 3.12. CONJUNTO EDAF E PRENSA-CABOS.....	84
FIGURA 3.13. ELEMENTOS DE ANCORAGEM DE FIBRA ÓPTICA.....	85
FIGURA 3.14. PRENSA-CABOS EM <i>NYLON</i> DOS EDAF.....	85
FIGURA 3.15. EDAF COM SISTEMA DE PRENSA-CABOS INTEGRADOS	86
FIGURA 3.16. EDAF COM SISTEMA DE PRENSA-CABOS INTEGRADOS	87
FIGURA 3.17. SISTEMA DTSS	88
FIGURA 3.18. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS	89

FIGURA 3.19. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	90
FIGURA 3.20. EQUIPAMENTOS PARA CALIBRAÇÃO DA CHUVA DE AREIA.....	93
FIGURA 3.21. CONFIGURAÇÃO DOS TESTES DOS EDAF	94
FIGURA 3.22. INSTALAÇÃO DO CABO DE FIBRA ÓPTICA NO TESTE DE ARRANCAMENTO.....	96
FIGURA 3.23. CHUVA DE AREIA E CONTROLE DO ÍNDICE DE VAZIOS	97
FIGURA 3.24. CONFIGURAÇÃO DOS TESTES DE ARRANCAMENTO.....	98
FIGURA 3.25. PREENCHIMENTO DA CAIXA DE CISALHAMENTO PELO MÉTODO DA CHUVA DE AREIA	99
FIGURA 3.26. CONFIGURAÇÕES DOS ENSAIOS – CAIXA DE CISALHAMENTO	100
FIGURA 3.27. ILUSTRAÇÃO DA DEFORMAÇÃO NA ZONA DE CISALHAMENTO	101
FIGURA 3.28. SEQUÊNCIA DO ENSAIO PARA SIMULAÇÃO NA ZONA DE CISALHAMENTO ...	102
FIGURA 4.1. CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	104
FIGURA 4.2. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA CHUVA DE AREIA.....	106
FIGURA 4.3. PRENSA-CABOS TIPO 1	107
FIGURA 4.4. DEFORMAÇÕES AO LONGO DO CABO DE FIBRA ÓPTICA (PRENSA-CABOS TIPO 1)	107
FIGURA 4.5. DEFORMAÇÕES IMPOSTAS <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÕES REGISTRADAS (PRENSA-CABOS TIPO 1)	109
FIGURA 4.6. PRENSA-CABOS TIPO 2	109
FIGURA 4.7. DEFORMAÇÕES AO LONGO DO CABO DE FIBRA ÓPTICA (PRENSA-CABOS TIPO 2)	110
FIGURA 4.8. DEFORMAÇÕES IMPOSTAS <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÕES REGISTRADAS (PRENSA CABOS TIPO 2)	110
FIGURA 4.9. EDAF COM SISTEMA DE PRENSA-CABOS INTREGADOS	111
FIGURA 4.10. DEFORMAÇÕES AO LONGO DO CABO DE FIBRA ÓPTICA (SISTEMA INTEGRADO)	112
FIGURA 4.11. DEFORMAÇÕES IMPOSTAS <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÕES REGISTRADAS (SISTEMA INTEGRADO)	112

FIGURA 4.12. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE PRENSA-CABOS.....	114
FIGURA 4.13. INTERAÇÃO CABO-SOLO NOS TESTES DE ARRANCAMENTO	115
FIGURA 4.14. TRECHO DO CABO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (SEM EDAF).....	115
FIGURA 4.15. DEFORMAÇÃO APLICADA <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (SEM EDAF)	117
FIGURA 4.16. TRECHO DO CABO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 25 MM A CADA 2,0 M).....	118
FIGURA 4.17. DEFORMAÇÃO APLICADA <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 25MM A CADA 2,0 M)	119
FIGURA 4.18. TRECHO DO CABO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 25 MM A CADA 1,0 M).....	120
FIGURA 4.19. DEFORMAÇÃO APLICADA <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 25 MM A CADA 1,0 M)	121
FIGURA 4.20. TRECHO DO CABO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 25 MM A CADA 0,5 M).....	122
FIGURA 4.21. DEFORMAÇÃO APLICADA <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 25 MM A CADA 0,5 M)	122
FIGURA 4.22. TRECHO DO CABO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 36 MM A CADA 2,0 M).....	123
FIGURA 4.23. DEFORMAÇÃO APLICADA <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 36 MM A CADA 2,0 M)	124
FIGURA 4.24. TRECHO DO CABO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 36 MM A CADA 1,0 M).....	124
FIGURA 4.25. DEFORMAÇÃO APLICADA <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 36 MM A CADA 1,0 M)	125
FIGURA 4.26. TRECHO DO CABO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 36 MM A CADA 0,5 M).....	125
FIGURA 4.27. DEFORMAÇÃO APLICADA <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 36 MM A CADA 0,5 M)	126
FIGURA 4.28. TRECHO DO CABO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 50 MM A CADA 2,0 M).....	126

FIGURA 4.29. DEFORMAÇÃO APLICADA VERSUS DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 50 MM A CADA 2,0 M)	127
FIGURA 4.30. TRECHO DO CABO VERSUS DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 50 MM A CADA 1,0 M).....	127
FIGURA 4.31. DEFORMAÇÃO APLICADA <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 50 MM A CADA 1,0 M)	128
FIGURA 4.32. TRECHO DO CABO <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 50 MM A CADA 0,5 M).....	128
FIGURA 4.33. DEFORMAÇÃO APLICADA <i>VERSUS</i> DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 50 MM A CADA 0,5 M)	129
FIGURA 4.34. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS COM EDAF DE 25 MM	130
FIGURA 4.35. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS COM EDAF DE 36 MM	130
FIGURA 4.36. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS COM EDAF DE 50 MM	131
FIGURA 4.37. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS COM EDAF ESPAÇADAS A CADA 2,0 M.....	132
FIGURA 4.38. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS COM EDAF ESPAÇADAS A CADA 1,0 M.....	132
FIGURA 4.39. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS COM EDAF ESPAÇADAS A CADA 0,5 M.....	133
FIGURA 4.40. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO 1.....	135
FIGURA 4.41. ZONA DE CISALHAMENTO – SEM EDAF – ENSAIO 1	136
FIGURA 4.42. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO 2.....	137
FIGURA 4.43. ZONA DE CISALHAMENTO – EDAF 50 MM A CADA 1 M – ENSAIO 2	138
FIGURA 4.44. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO 3.....	139
FIGURA 4.45. ZONA DE CISALHAMENTO – EDAF 50 MM A CADA 1 M – ENSAIO 3	140
FIGURA 4.46. POSIÇÃO DO EDAF NO ENSAIO 3	141
FIGURA 4.47. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO 4.....	141
FIGURA 4.48. ZONA DE CISALHAMENTO – EDAF 50 MM A CADA 2 M – ENSAIO 4	142
FIGURA 4.49. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO 5.....	143
FIGURA 4.50. ZONA DE CISALHAMENTO – EDAF 50 MM A CADA 2 M – ENSAIO 5	144

FIGURA 4.51. COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS NO DESLOCAMENTO APLICADO DE 0,8 CM	146
FIGURA 4.52. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS NO DESLOCAMENTO APLICADO DE 20 CM ..	147
FIGURA 5.1. DISPOSITIVO PARA TRACIONAMENTO DE CABOS DE FIBRA ÓPTICA.....	150
FIGURA 5.2. DISPOSITIVO PARA SIMULAR A ZONA DE TRANSIÇÃO.....	151
FIGURA 5.3. EDAF DE 25 MM COM SISTEMA DE PRENSA-CABOS EM <i>NYLON</i>	152
FIGURA 5.4. EDAF DE 36 E 50 MM COM SISTEMA DE PRENSA-CABOS INTEGRADOS	153
FIGURA 6.1. INTERPRETAÇÃO DO MOVIMENTO COM SENSOR DISTRIBUÍDO DE FIBRA ÓPTICA	155

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1. EVOLUÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO (AFFONSO, 2004).....	20
TABELA 2.2. CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA (ADAPTADO DE GLISIC E INAUDI, 2007).....	64
TABELA 2.3. COMPARAÇÃO ENTRE MEDIDAS DE NÍVEL DE ÁGUA NO TERRENO.....	72
TABELA 2.4. COMPARAÇÃO ENTRE TECNOLOGIAS PARA MEDIDAS DE DEFORMAÇÃO (BENNETT, 2008).....	74
TABELA 4.1. RESULTADO DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS.....	103
TABELA 4.2. COMPACIDADE DE SOLOS GRANULARES (PINTO, 2006)	105
TABELA 4.3. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA CHUVA DE AREIA.....	105
TABELA 4.4. COMBINAÇÕES DOS TESTES DE ARRANCAMENTO	114
TABELA 4.5. CONFIGURAÇÕES DOS ENSAIOS PARA SIMULAÇÃO DA ZONA DE CISLHAMENTO	134

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

cm - centímetro;

cm³ - centímetro cúbico;

g - gramas;

g/cm³ - gramas por centímetro cúbico

Hz - Hertz;

n - Índice de refração da fibra;

e_{máx} - Índice de vazios máximo;

e_{mín} - Índice de vazios mínimo;

e - Índice de vazios natural;

IPT - Instituto de pesquisas tecnológicas de São Paulo;

LED - Laser emissor de luz;

± - Mais ou menos;

M_{máx} - Massa de solo compacto em gramas;

M_{mín} - Massa de solo fofo em gramas;

ρ_s - Massa específica dos grãos;

ρ - Massa específica natural;

MNA-FO - Medidor de nível de água com base em tecnologia de fibra óptica;

MHz - Mega hertz;

m ou M - Metro;

m/s - metros por segundo;

με - Micro deformações;

μm - Micro metro;

μrad - Micro radianos;

mm - Milímetro;

mm/min - milímetros por minuto;

\$ - Moeda norte americana, Dólar;

(x 1,02m) - Multiplicado por 1,02 metros;

nm - Nanometro;

NA - Nível de água;

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora;

Nº - Número;

PVC - Policloreto de vinila;

% - Porcentagem;

kHz - Quilo hertz;

km - Quilômetro;

kPa - Quilo Pascal;

LAN - Redes de área local;

SDFO – Sensor distribuído de fibra óptica;

SFO - Sensor de fibra óptica;

DTS - Sensor distribuído de temperatura;

DTSS - Sensor distribuído de temperatura e deformação;

SiO₂ - Sílica;

GPS - Sistema global de posicionamento terrestre;

Temp - Temperatura;

v_a - Velocidade da onda acústica;

V_m - Volume do molde em centímetros cúbicos.

1 INTRODUÇÃO

As mais divergentes necessidades do desenvolvimento tecnológico impulsionam diferentes áreas do conhecimento, entre estas, o mercado de trabalho voltado à construção civil. Este mercado exige com que medidas preventivas sejam tomadas para garantir a segurança das construções e prevenir possíveis desastres materiais e ambientais. Isto faz com que cada vez mais centros de pesquisas busquem novos horizontes para o desenvolvimento junto ao mercado de trabalho.

Neste contexto, a indústria de fibras ópticas teve um crescente e significativo desenvolvimento a partir do final da década de 80. Além da fibra óptica, até então empregada como instrumento de dados, no setor de telecomunicações, toda uma tecnologia de equipamentos e sistemas de dados evoluiu em qualidade, quantidade e custo. A partir destas evoluções diversas empresas passaram a se interessar por esta tecnologia, sabendo que além da comunicação de dados, outras grandezas poderiam ser transmitidas por uma fibra óptica. Agora, através de técnicas controladas, a luz pode gerar sinais associados a uma vasta gama de grandezas físicas, funcionando com um sensor. Deformação, deslocamento, aceleração, pressão, temperatura e propriedades químicas são algumas possibilidades desta tecnologia (MORIKAWA, 2004).

Lee (2003) apresentou as porcentagens da utilização da fibra óptica em tipos de grandezas medidas e nível de tecnologia empregada para medi-las. As Figuras 1.1 e 1.2 ilustram o comentado.

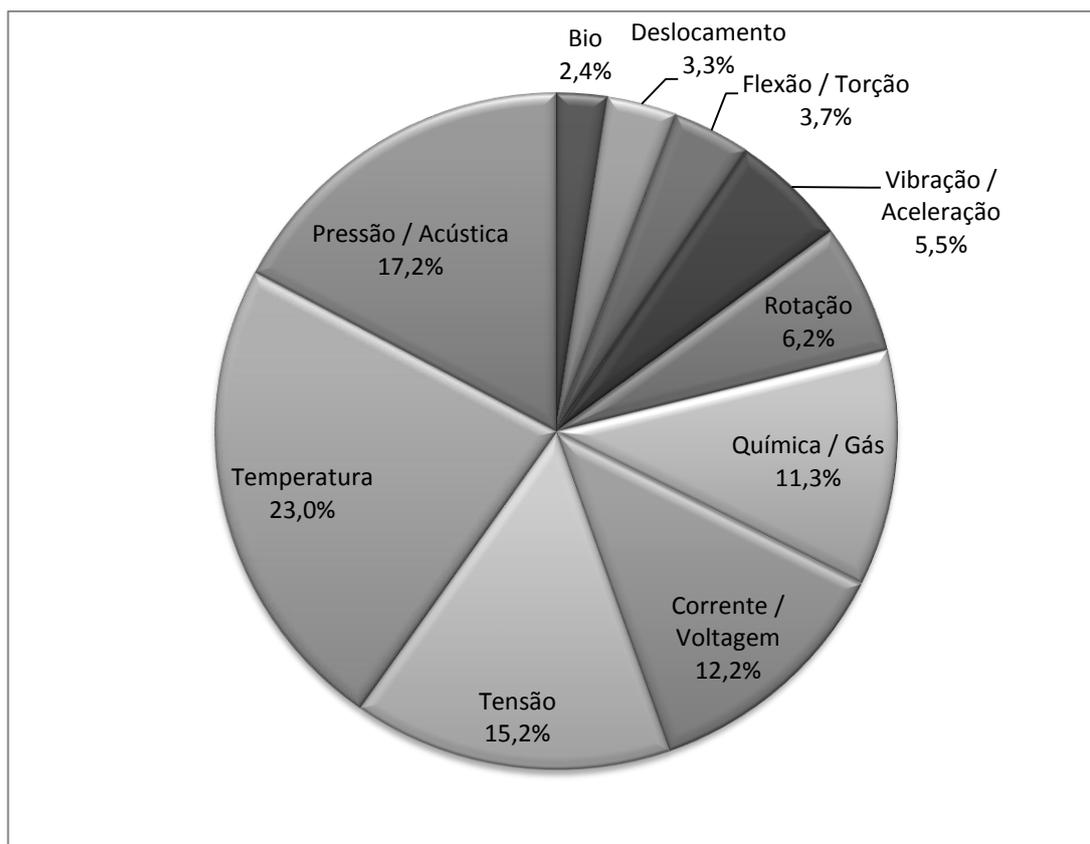


FIGURA 1.1. GRANDEZAS FÍSICAS MEDIDAS (ADAPTADO DE LEE, 2003)

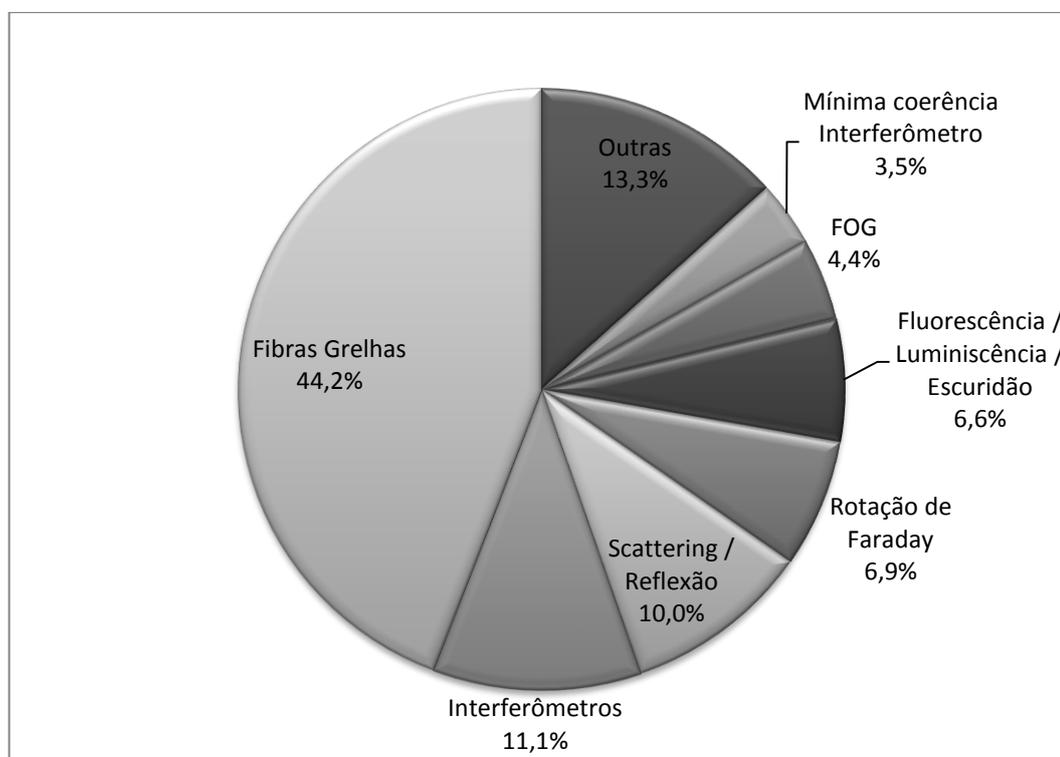


FIGURA 1.2. TECNOLOGIA EMPREGADA PARA MEDIR GRANDEZAS FÍSICAS (ADAPTADO DE LEE, 2003)

Dentre as vantagens tecnológicas do emprego dos sensores de fibra óptica, as mais destacadas são: (i) a possibilidade de sensoriamento de diversos sinais

através de uma única fibra (multiplexação de dados); (ii) facilidade de leitura dos sinais obtidos (boa relação sinal *versus* ruído); (iii) medições a longas distâncias (sensoriamento remoto); (iv) imunidade a campos eletromagnéticos; (v) ausência de faísca; e (vi) baixo peso e baixa reatividade do material.

Quanto ao custo do emprego da tecnologia de fibra óptica, é notório que os avanços tecnológicos e de economia de escala no ramo das telecomunicações têm servido para impulsionar e viabilizar projetos, antes limitados aos meios acadêmicos. Frequentemente, para qualquer novo sensor ou técnica na área, o uso de componentes e equipamentos já disponíveis na indústria de fibras ópticas é largamente empregado nas empresas de telecomunicações. Este avanço torna-se uma medida atrativa para outras empresas de outros setores desenvolverem novos sensores com tecnologia de fibra óptica, para além de transmitirem sinais como imagem e som, poderem transmitir outras grandezas físicas, como temperatura, deformação, pressão, etc.

A utilização da fibra óptica como instrumento de monitoramento geotécnico pode-se tornar uma medida muito atrativa e econômica quando comparado com instrumentos convencionais, como piezômetros, inclinômetros, medidores de recalque, entre outros. Um cabo de fibra óptica pode abranger uma área de monitoramento superior a instrumentação convencional, além da possibilidade do monitoramento de mais de uma grandeza física com o mesmo cabo de fibra óptica.

1.1 OBJETIVO GERAL

A instrumentação geotécnica desde o seu surgimento vem evoluindo com o decorrer dos anos, devido ao avanço tecnológico e a complexidade das estruturas civis. Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma metodologia para avaliar a

eficiência dos sensores distribuídos de fibra óptica para monitoramento de movimentos de massa.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

O objetivo específico desta pesquisa é desenvolver um experimento para detectar e monitorar os movimentos relativos na transição entre a zona estável e a área de movimento de massa em um meio contínuo de solo com o método distribuído de temperatura e deformação (DTSS), através do espectro de luz conhecido como *Brillouin*. A Figura 1.3 ilustra o modelo conceitual para simulação e interpretação do movimento a partir de dados de deformação na fibra óptica (FO).

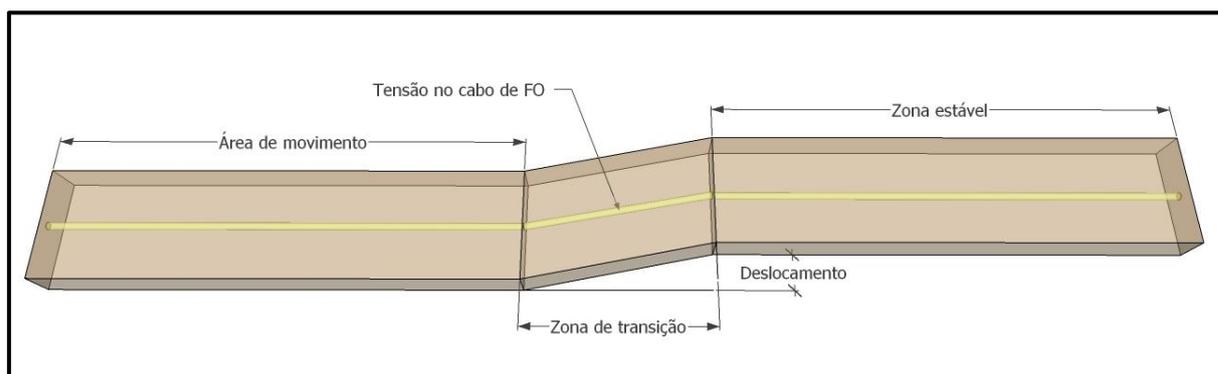


FIGURA 1.3. MODELO CONCEITUAL PARA SIMULAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE MOVIMENTO

Para avaliação deste modelo conceitual, foi desenvolvida uma caixa metálica bipartida, denominada neste estudo de caixa de cisalhamento, e sistemas de ancoragem específicos para o cabo de fibra óptica denominados EDAF (Elementos de Ancoragem do Cabo de Fibra Óptica). A caixa de cisalhamento tem objetivo de simular em verdadeira grandeza os movimentos de massa que ocorrem em campo. Para cumprir os objetivos da pesquisa são listadas as etapas a seguir:

- Desenvolvimento de um sistema para tracionamento do cabo de fibra óptica;

- Desenvolvimento de âncoras para o cabo de fibra óptica;
- Avaliação dos sistemas de ancoragem no cabo de fibra óptica;
- Desenvolvimento de um experimento para avaliação de movimentos de massa no sentido longitudinal do cabo de fibra óptica (teste de arrancamento);
- Avaliação das dimensões e espaçamento entre âncoras a partir dos resultados dos testes de arrancamento;
- Desenvolvimento de um experimento para avaliação de movimentos de massa no sentido transversal ao cabo de fibra óptica (simulação da zona de cisalhamento); e
- Avaliação da identificação da zona de transição, entre zona estável e a área de movimento, a partir dos resultados dos experimentos para simulação da zona de cisalhamento.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A revisão bibliográfica, que é apresentada no Capítulo 2, aborda os temas principais para conceituação da pesquisa e seguem uma ordem cronológica no seu desenvolvimento. A revisão é dividida em quatro temas principais: (i) Histórico da instrumentação que mostra que muitos dos instrumentos geotécnicos utilizados hoje não foram criados para tal fim, mas passaram por um processo de evolução de outras áreas; (ii) Critérios de instrumentação que descreve alguns motivos do por que instrumentar; (iii) Instrumentação geotécnica para monitoramento de movimentos de massa superficiais e subsuperficiais; e (iv) Tecnologia de fibra óptica que descreve os princípios básicos do seu funcionamento e apresenta alguns trabalhos recentes com uso desta tecnologia no meio geotécnico.

O Capítulo 3 aborda a metodologia empregada para o desenvolvimento da pesquisa. Neste capítulo são descritos os equipamentos e materiais desenvolvidos e utilizados nos experimentos e os procedimentos detalhados de cada ensaio realizado.

O Capítulo 4 aborda as apresentações, discussões e análise dos resultados descritos no Capítulo 3. Os resultados são apresentados graficamente e as discussões são realizadas no comportamento gráfico de cada curva.

O Capítulo 5 aborda as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentado um breve histórico sobre a instrumentação geotécnica, uma descrição dos principais instrumentos para medidas de descolamento de superfície e de subsuperfície e os princípios básicos da instrumentação com utilização da tecnologia de fibra óptica.

2.1 HISTÓRICO DA INSTRUMENTAÇÃO

O surgimento da instrumentação geotécnica para monitoramento de instabilidades de encostas surgiu entre os anos de 1930 e 1940 (AFFONSO, 2004). A importância do estudo de monitoramento através da instrumentação deu-se ao longo dos anos com o avanço da engenharia e a complexidade cada vez maior das estruturas. Desde o seu surgimento até os dias atuais, constatou-se um elevado desenvolvimento das atividades de instrumentação. Nos primeiros anos de surgimento, predominaram os instrumentos simples, mecânicos e hidráulicos. Com o avanço tecnológico, surgiram equipamentos mais sofisticados, como transdutores pneumáticos, elétricos, sistemas de aquisição de dados, monitoramentos remotos entre outros.

Pode-se afirmar que anteriormente a 1930 já existiam alguns instrumentos geotécnicos, entretanto, com outras finalidades. São os casos do piezômetro e do inclinômetro. É curioso observar que um dos instrumentos mais utilizados na geotecnia, o piezômetro, tenha sido desenvolvido na área da saúde. Referente ao assunto, Stephen Hales, em 1733, mediu a pressão sanguínea de um cavalo. A Figura 2.1 apresenta uma ilustração do experimento de *Hales*, que demonstra um tubo, que nada mais é do que um piezômetro.



FIGURA 2.1. O PRIMEIRO PIEZÔMETRO

As duas imagens apresentadas na Figura 2.2, ilustram a réplica do inclinômetro construído por *Leonardo Da Vinci*, provavelmente na década de 1480. Este equipamento foi idealizado para controlar a posição do ar nas máquinas voadoras imaginadas pelo autor. O processo de funcionamento do inclinômetro estava vinculado ao posicionamento horizontal que a máquina deveria atingir, indispensável para certas condições de vôo, a pequena esfera no interior da cúpula de vidro deveria permanecer exatamente no centro do vidro.

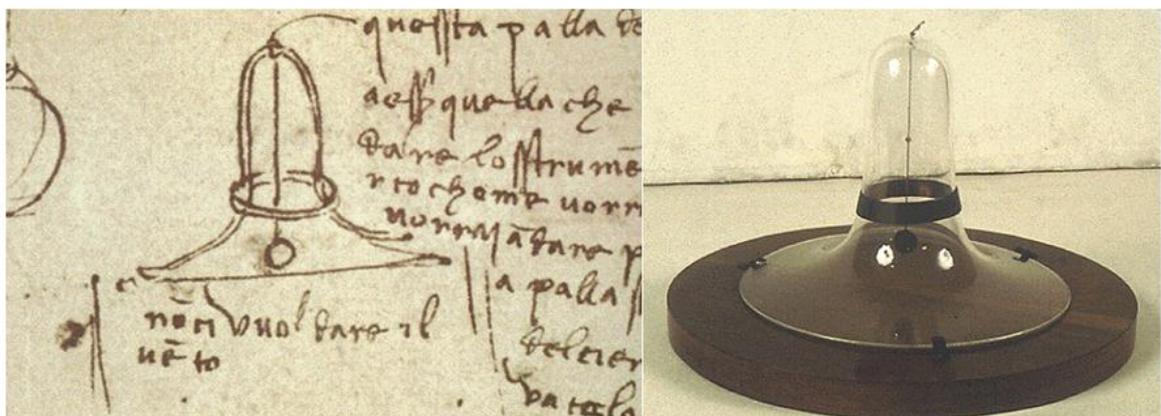


FIGURA 2.2. O PRIMEIRO INCLINÔMETRO

Para determinar os equipamentos que atendam às necessidades da instrumentação de uma obra, torna-se necessário conhecer as grandezas físicas que são usualmente medidas. Estas medidas tratam-se principalmente de: (i) deslocamentos que quando referidos a um comprimento conhecido podem ser convertidos em deformações; (ii) pressões que podem ser convertidas em forças ou em volume através da correlação da variação da coluna d'água; (iii) vazão; (iv) topografia; (v) temperatura; e (vi) vibração.

Segundo Dunnicliff (1988), a instrumentação geotécnica envolve a união das capacidades dos instrumentos de medida e das capacidades das pessoas. A prática da instrumentação não se restringe apenas à seleção de instrumentos, sendo na verdade um processo que começa com a definição do objetivo e termina com a análise rigorosa dos dados coletados. Cada passo neste processo é relevante para o sucesso do programa de instrumentação. A Tabela 2.1 apresenta a evolução da instrumentação geotécnica ao longo dos anos.

TABELA 2.1. EVOLUÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO (AFFONSO, 2004)

Ano	Principais características
Até 1920	Instrumentação praticamente inexistente.
1920 a 1930	Observação eventual de subpressões, vazões de drenagem e deslocamentos superficiais.
1940 a 1950	Medições de pressão neutra e de deformação, porém com instrumentos de pouca confiabilidade.
1960	Primeiras obras com medição de deslocamentos horizontais com inclinômetros e com instalação de células de pressão total em aterros.
1970	Medições de tensão e deformação. Os instrumentos de medição ganham confiabilidade. O método dos elementos finitos passa a ser aplicado em análises paramétricas de projeto e na análise dos dados.
1980	Desenvolvimento de instrumentos nacionais, exceção feita aos inclinômetros e piezômetros de corda vibrante. Início da aplicação generalizada dos recursos da informática para projeto e análise.
1990	Aperfeiçoamento dos instrumentos de medição e informatização das fases de coleta, transmissão, processamento e análise dos dados. Automatização da instrumentação de algumas barragens.
2000	Aperfeiçoamento das técnicas de medição. Aquisição remota de dados, com uso de satélites espaciais.

No início do século XXI, a evolução tecnológica direcionou-se para o desenvolvimento da instrumentação com utilização de fibra óptica, oferecendo vantagens quando comparado com sistemas tradicionais de medição. A instrumentação por fibra óptica, em relação à convencional, é imune a descargas atmosféricas, pode ter uma abrangência espacial de até 30 km de raio por cabo óptico, possibilidade de multiplexação de dados, sensoriamento remoto, não interfere em campos eletromagnéticos ou ondas de rádio. Nos dias atuais estas características da utilização da fibra óptica impulsionam o mercado de trabalho e fazem com que, cada vez mais, centros de excelência em pesquisas busquem novos conhecimentos sobre esta tecnologia (MORIKAWA, 2004).

2.2 CRITÉRIOS DE INSTRUMENTAÇÃO

Como critérios para executar uma instrumentação de qualidade, pode-se citar o trabalho de Kanji (1990). O autor levanta uma série de questões, visando esclarecer a importância e a necessidade da instrumentação de obras geotécnicas. A primeira destas questões envolve os motivos que levam à adoção da instrumentação, ou seja, “por que instrumentar?”. Uma concepção deste questionamento é exposta na sequência.

Para garantir a adequação do projeto à realidade da obra os ensaios laboratoriais muitas vezes podem não ser suficientemente representativos para o porte da obra ou até mesmo quanto às dimensões das amostras utilizadas. Por isso, ao comparar a escala da obra com a escala da amostra, certamente ocorrerão incertezas quanto à representatividade dos ensaios de laboratório. Ao efetuarem-se instrumentações de campo, pode-se diminuir este efeito de escala, garantindo o acompanhamento da obra progressivamente, durante sua construção e operação. Desta forma, torna-se possível comparar as hipóteses de projeto com o comportamento real da obra.

Para garantir a segurança da obra durante o período construtivo e durante sua operação, a instrumentação tem a finalidade de detectar e prever comportamentos indesejáveis com antecedência, permitindo assim a intervenção com medidas de segurança e corretivas.

Ainda neste mesmo contexto, Marinho (2005) levanta uma série de questionamentos como: “investigação geotécnica para quê?”, “por que investigar?”, “o que é uma investigação geotécnica adequada?” e “qual a melhor investigação a ser feita?”

Projetar conhecendo os aspectos geológico-geotécnicos é a melhor forma de fazer engenharia. A investigação geotécnica além de minimizar custos e riscos, é uma forma de demonstrar responsabilidade para com a sociedade e respeito ao meio ambiente. A falta da investigação ou a má interpretação de dados resulta em projetos inadequados, atrasos na obra, elevação dos custos por alterações no projeto consolidado, problemas ambientais e até mesmo ruptura da obra (MARINHO, 2005).

O manual de instrumentação de barragens e diques do exército americano (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1995) cita que a determinação do número, tipo, e localização dos instrumentos geotécnicos requeridos em uma barragem podem ser escolhidas pela experiência, bom senso e intuição do engenheiro projetista. Obras geotécnicas representam situações únicas e requerem soluções individuais para suas necessidades quanto à instrumentação. O responsável pelo empreendimento deve entender os fenômenos físicos e mecânicos envolvidos, assim como as condições naturais do ambiente na instrumentação em campo, e como será o desempenho dos instrumentos disponíveis sob as condições de trabalho. Os principais objetivos de um plano de instrumentação geotécnica podem ser agrupadas em quatro categorias:

- (i) - Avaliações analíticas;
- (ii) - Previsão do desempenho futuro;
- (iii) - Avaliações legais; e
- (iv) - Desenvolvimento e verificação de projetos futuros.

A avaliação analítica, obtida a partir da instrumentação geotécnica, pode ser utilizada para verificar parâmetros e pressupostos de projeto, técnicas de construção e analisar eventos adversos, além de verificar se o desempenho será satisfatório. A

previsão do desempenho futuro refere-se aos dados da instrumentação obtidos que demonstram o comportamento futuro da barragem. Estas previsões devem ser um indicativo das condições satisfatórias da operação normal ou uma indicação do potencial de risco futuro que necessite de intervenções corretivas. As avaliações legais podem ser valiosas para possíveis litígios na fase de construção ou na fase de operação. Estes dados podem ser utilizados como auxílio nas determinações das causas ou da extensão do evento de modo que processos judiciais possam ser avaliados. A análise do desempenho das atuais barragens e dos dados da instrumentação gerados durante o funcionamento pode ser utilizada para aperfeiçoar o estado da arte da concepção e da construção. Dados da instrumentação de projetos existentes podem promover projetos mais seguros e mais econômicos (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1995).

Segundo Marinho (2005), antes de investigar é necessário definir o escopo e o propósito da investigação. O escopo é determinado pela etapa do projeto e o propósito da investigação está associado às características do projeto, ou seja, estabilidade de taludes, remediação de rupturas, etc.

Peck (1969) destaca que a investigação é fundamental, juntamente com o estabelecimento das condições mais prováveis e mais desfavoráveis. Segundo inúmeros trabalhos, a condição mais desfavorável é aquela em que o solo encontra-se na condição saturada. Neste contexto o clima tem papel fundamental. Já pensando nas condições mais prováveis, o engenheiro geotécnico deve escolher aqueles parâmetros que deverão ser monitorados durante a construção e a vida útil da obra, lembrando-se que com a variação sazonal os parâmetros geotécnicos também sofrem variações e é de fundamental importância para a estabilidade de taludes. A

investigação deve servir de base para que se tenha sempre em mente uma alternativa que responda às observações feitas por meio do monitoramento da obra.

2.3 INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA PARA MONITORAMENTO DE MOVIMENTOS DE MASSA

Neste item serão abordados os principais instrumentos geotécnicos para o monitoramento de deformações e deslocamentos em um maciço de terra, descrevendo os objetivos básicos e princípios de funcionamento.

2.3.1 Medidores de deslocamentos de superfície

Os métodos de monitoramento de movimentos superficiais incluem métodos de observações visuais e instrumentos específicos para determinar deslocamentos horizontais e verticais, como marcos superficiais, GPS e eletrônicos; abordados nos itens seguintes deste capítulo. Em uma área de escorregamento ativo, os movimentos de massa superficiais são normalmente monitorados para determinar a extensão da atividade do escorregamento e a velocidade com que ocorrem.

2.3.1.1 *Marcos topográficos*

Os marcos topográficos, um dos mais antigos e simples métodos para observação de deslocamentos, correspondem a pontos de referência fixos para controle dos deslocamentos horizontais e verticais do maciço. A distribuição espacial dos marcos topográficos em um aterro é definida em função das necessidades da avaliação e interpretação do comportamento de deformações no maciço. Normalmente, em barragens de terra e enrocamento, estes são distribuídos em

alinhamentos ao longo de seções transversais aos taludes do aterro, possibilitando a instrumentação de segmentos representativos do maciço.

Em barragens de terra e enrocamento as medições dos deslocamentos verticais e horizontais, com o uso de marcos de deslocamento superficial, são importantes para o acompanhamento dos recalques e do comportamento do talude de jusante, uma vez que estes instrumentos apresentam como desvantagem o fato de não permitirem a observação dos recalques do talude de montante após o enchimento do reservatório. O monitoramento dos recalques é realizado no período construtivo, durante o enchimento do reservatório e prossegue durante a fase de operação do barramento.

As leituras destes instrumentos para monitoramento dos recalques são realizadas de forma sistemática e periódica por meio de levantamento topográfico eletrônico de precisão. Para isto, faz-se necessário a instalação de estações topográficas em locais que não apresentem deformações, de modo que se obtenha um referencial fixo, em inglês designado como *benchmark* (Figura 2.3), enquanto aquele estabelecido para servir de referência para a medição de deslocamentos horizontais é chamado de *horizontal control station* ou *reference monument* (Figura 2.4). Os recalques são determinados por meio de nivelamento de precisão, e os deslocamentos horizontais, por meio de triangulações ou colimações geodésicas (SILVEIRA, 2006).



FIGURA 2.3. ESTAÇÃO TOPOGRÁFICA INSTALADA EM UM *BENCHMARK* (LEICA GEOSYSTEMS)



FIGURA 2.4. PRISMA DE MONITORAMENTO - *REFERENCE MONUMENT* (LEICA GEOSYSTEMS)

Os resultados das leituras e o acompanhamento das movimentações em superfície permitem obter o rumo e a intensidade dos deslocamentos horizontais e a variação de magnitude e a velocidade dos deslocamentos verticais ao longo do tempo. As análises conjuntas dos resultados das leituras dos marcos topográficas permitem identificar os locais do maciço onde podem estar ocorrendo movimentações mais acentuadas e/ou rápidas, orientando as inspeções visuais de verificação ou consolidação (JORGE *et al.*, 2004). A sensibilidade deste tipo de

instrumentação pode chegar a cerca de $\pm 1,0$ mm, para distâncias da ordem de 1 km do ponto de visada.

A precisão e a confiabilidade dos dados obtidos com este tipo de monitoramento dependem de alguns fatores como:

- Repetibilidade na centralização e no posicionamento dos instrumentos de medidas topográficas (*estação total*) nas estações de referências;
- As estações de referência devem, preferivelmente, estar posicionadas sobre afloramentos rochosos ou com sua base em rocha, assim contribuem com a confiabilidade dos recalques medidos. Caso não haja afloramento rochoso, a estação de referência deve ser ancorada em profundidade.
- Proteção dos marcos contra acidentes e vandalismos;
- Experiência da equipe topográfica;
- Influência das condições meteorológicas, que em temperaturas elevadas pode ocorrer distorções nas leituras, devido à refração do ar próximo a superfície. Isso acontece porque o ar que está próximo ao solo esquenta e se expande, provocando uma queda em sua densidade, diminuindo seu índice de refração em relação ao ar que está mais longe do solo;
- Extensão das distâncias de visada.

A Figura 2.5 ilustra um aspecto de projeto de marcos superficiais e a Figura 2.6 apresenta o marco de referência construído a partir do projeto ilustrado na figura anterior.

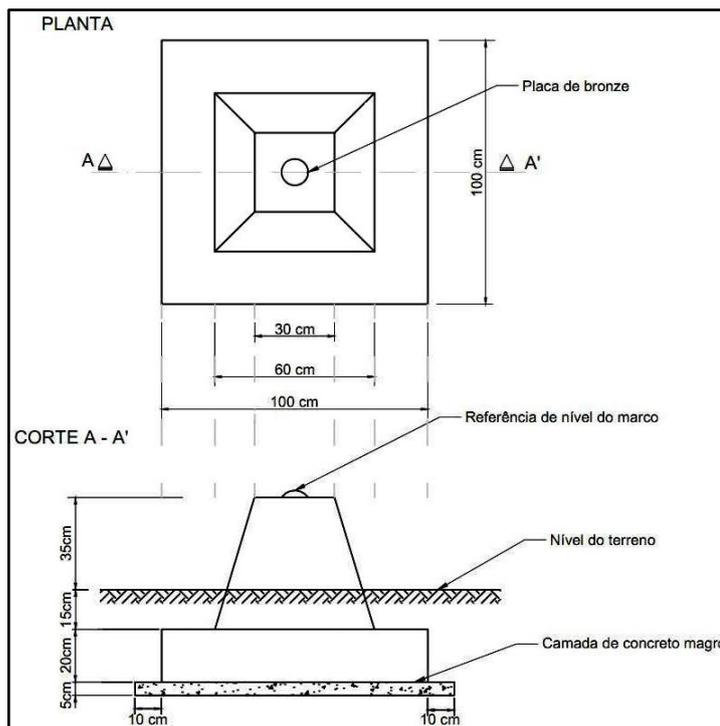


FIGURA 2.5. DETALHE DE PROJETO DE UM TIPO DE MARCO SUPERFICIAL

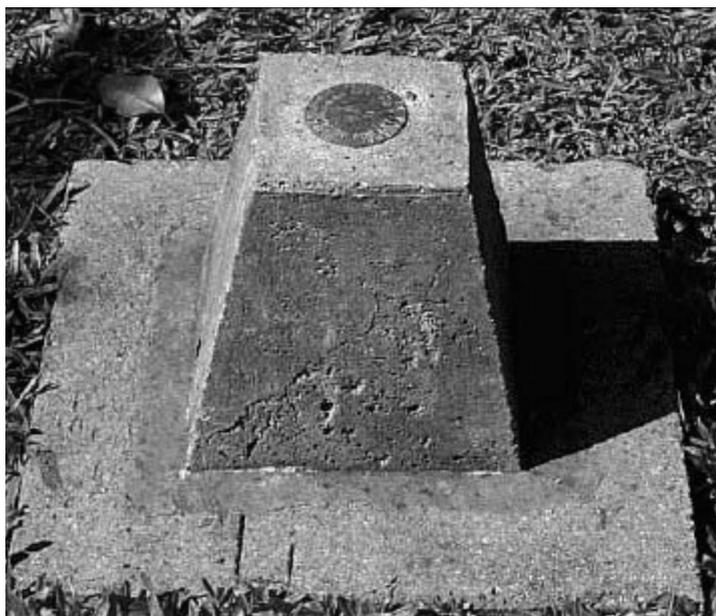


FIGURA 2.6. MARCO SUPERFICIAL

2.3.1.2 GPS (Global Positioning System – Sistema de Posicionamento Global)

O GPS é um sistema de radio-navegação desenvolvido na década de 1970 pela marinha em conjunto com a força aérea dos Estados Unidos para viabilizar a determinação da posição e do tempo para as tropas militares e mísseis guiados. No entanto, em razão da alta acurácia proporcionada pelo sistema e do avanço no

desenvolvimento da tecnologia envolvida nos receptores de GPS, uma grande comunidade usuária emergiu dos mais variados segmentos da comunidade civil (navegação, posicionamento geodésico, agricultura, controle de frotas etc.) (NELSON, 1999).

O princípio básico de navegação com GPS consiste na medida de distâncias entre a antena do GPS e quatro satélites. Conhecendo as coordenadas dos satélites num sistema de referência apropriado, é possível calcular as coordenadas da antena do usuário no mesmo sistema de referência dos satélites. Do ponto de vista geométrico, apenas três distâncias, desde que não pertencentes ao mesmo plano, seriam suficientes. Nesse caso, o problema se reduziria à solução de um sistema de três equações com três incógnitas. A quarta medida é necessária em razão do não sincronismo entre os relógios dos satélites e o do usuário, adicionando uma quarta incógnita ao problema (MONICO, 2000).

O sistema de radio-navegação atualmente é composto por uma constelação de 24 satélites e sua estação terrestre. Os receptores GPS estão sendo minimizados por apenas alguns circuitos integrados, devido ao avanço tecnológico. Posicionados sobre a superfície, as antenas medem o tempo de viagem dos sinais de rádio por no mínimo três dos 24 satélites. A localização das antenas é determinada por triangulação e por complexas relações geométricas que permitem a temporização precisa a partir dos sinais de rádio dos satélites. A posição da antena é calculada com precisão métrica, com a qualidade dos equipamentos e com o avanço do GPS as posições podem ser calculadas a cerca de 1 cm (HUNT, 2005).

Segundo Khamarrul e Wan Aziz (2003), o GPS tem sido visto como um método fiável, rápido, barato, fácil e cada vez mais versátil no estudo de movimentos

de massa. Com a utilização do GPS os autores afirmam que é possível detectar, classificar e monitorar deslizamentos de terra. Ervideira *apud* Gassner *et al.* (2004), mostra que a precisão do GPS, nas condições mais desfavoráveis em vertentes muito inclinadas e com grande diferença de altitude a precisão é de 3 a 4 mm para movimentos horizontais e 7 mm para movimentos verticais com monitoramento em tempo “quase-real” (com atraso de 30 segundos).

Souza *et al.* (2012) georeferenciou através do GPS movimentos de massa que ocorreram em janeiro de 2011, na bacia do rio São Pedro – município de Nova Friburgo, com objetivo de identificar tipologias de movimentos de massa. Outro trabalho similar foi realizado por Riffel e Guaselli (2012). Os autores, visando contribuir para o entendimento de desastres naturais, realizaram expedições de campo, na bacia hidrográfica do rio Paranhana, localizado no Rio Grande do Sul, com a utilização de um GPS topográfico e técnicas de geoprocessamento e imagens de satélite para identificar áreas de risco e monitorar movimentos de massa.

2.3.1.3 *Eletrônicas*

Eletrônicas são sensores elétricos dotados de transdutores eletrolíticos de alta precisão, que indicam a rotação ou a distorção angular através da resistência elétrica entre pinos que constituem o elemento de medição. Os transdutores funcionam baseados no princípio fundamental de que uma bolha, suspensa em uma cápsula contendo um líquido eletrolítico, é biseccionada pela direção vertical da gravidade. Quando o transdutor gira, é alterada linearmente a resistência elétrica medida através do líquido eletrolítico. Um circuito elétrico transforma esta variação de resistência em leituras altamente precisas. Estes transdutores são protegidos por

uma blindagem metálica estanque ligada através de cabos elétricos a uma central de leituras (CAVALCANTI *et al.*, 1994).

Os eletrônives foram desenvolvidos para a indústria aeronáutica há mais de 50 anos. Os primeiros trabalhos com esta técnica de instrumentação aplicada à geotecnia foram desenvolvidos na Inglaterra, no estudo do comportamento de estacas submetidas a carregamento lateral (COOKE e PRICE, 1974).

O princípio do funcionamento de um eletrônível pode ser comparado a um nível de bolha tradicional, como os utilizados na construção civil para verificar a horizontalidade em uma superfície plana. Entretanto, o líquido é uma solução condutora de eletricidade (líquido eletrolítico), onde três eletrodos coplanares entre si penetram na cápsula e quando na horizontal permanecem parcialmente imersos neste líquido, como ilustrado na Figura 2.7. A resistência entre o eletrodo central e os eletrodos da extremidade varia em função da inclinação à qual é submetida à cápsula.

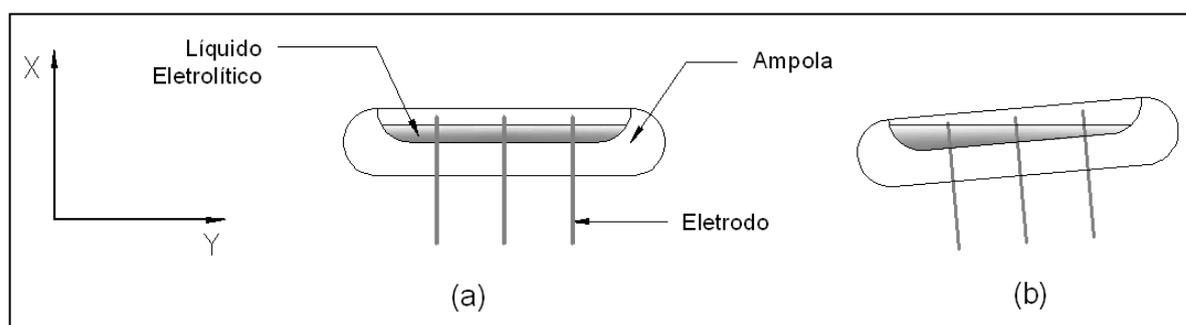


FIGURA 2.7. PRICÍPIO DO FUNCIONAMENTO DO ELETRÔNÍVEL

Os eletrônives podem sofrer rotações com relação à linha normal vertical que passa pelo eixo do eletrônível de até $\pm 6^\circ$, ou podem assumir outra faixa de valores dependendo do fabricante. Esta variação angular é tomada em relação à linha normal ao eletrônível. Para rotações superiores à especificada pelo fabricante, o eletrônível pode apresentar um comportamento não linear (AFFONSO, 2004). A

Figura 2.8 ilustra um eletrônível. No lado esquerdo da figura citada, encontra-se o cilindro contendo o líquido eletrolítico e à direita sua unidade leitora.

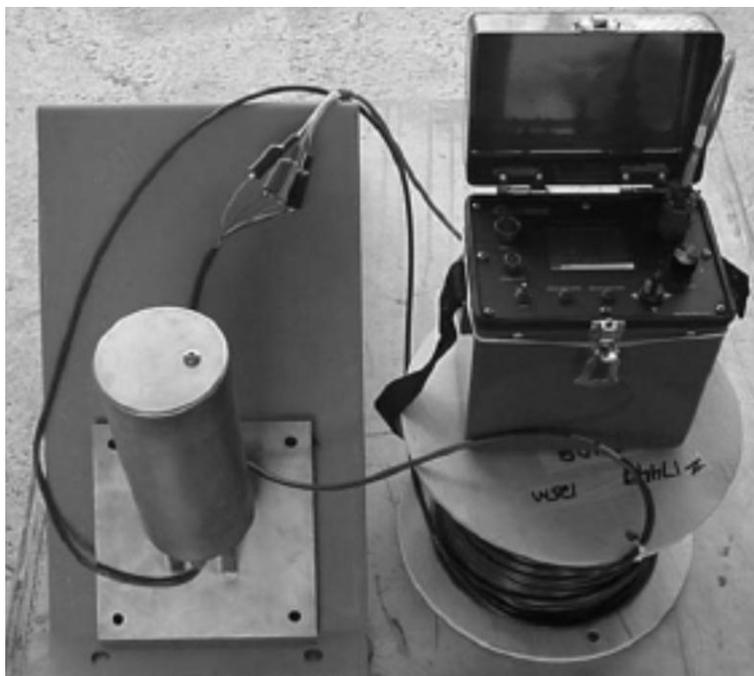


FIGURA 2.8. ELETRÔNÍVEL E UNIDADE LEITORA (AFFONSO, 2004)

2.3.2 Medidores de deslocamentos de subsuperfície

Os medidores de deslocamentos de subsuperfície têm o objetivo de monitorar movimentos de massa que não são detectados na superfície visualmente, normalmente a partir do primeiro metro de profundidade. O monitoramento das deformações internas pode ser importante para verificar a compressibilidade das diversas camadas compactadas ou a compatibilidade entre materiais adjacentes. Serão descritos neste item os medidores de deslocamentos verticais e horizontais. Devido a inúmeros instrumentos desenvolvidos, que podem ser utilizados para o monitoramento de deslocamentos, serão abordados nos próximos itens apenas alguns instrumentos que já são consagrados na geotecnia, como a caixa sueca, o medidor de recalques tipo KM, medidor de recalques IPT, medidor de recalque magnético, inclinômetros e fita de cisalhamento.

2.3.2.1 Medidor hidrostático de recalque (*caixa sueca*)

O medidor hidrostático de recalque, também conhecido como *caixa sueca*, é utilizado para determinar deslocamentos verticais em um maciço de terra ou de enrocamento. O seu funcionamento é baseado no princípio dos vasos comunicantes. O método é bastante similar ao utilizado na construção civil, conhecido como *nível de mangueira*, e é largamente empregado em obras de pequeno porte, como na construção de casas e edifícios.

O equipamento é constituído de tubos e mangueiras, instalados onde se deseja conhecer o deslocamento vertical. Estes tubos são protegidos por uma caixa, origem do nome "*caixa sueca*", e são levados através de mangueiras até um ponto onde um painel de leituras possibilita o monitoramento dos recalques. Um único painel de leitura pode receber várias caixas suecas, quando instaladas em locais com cotas aproximadamente iguais.

Uma ilustração do medidor de recalque hidrostático é apresentada na Figura 2.9. Na sequência, é descrito o princípio básico do funcionamento do instrumento em questão, apresentado por Affonso (2004).

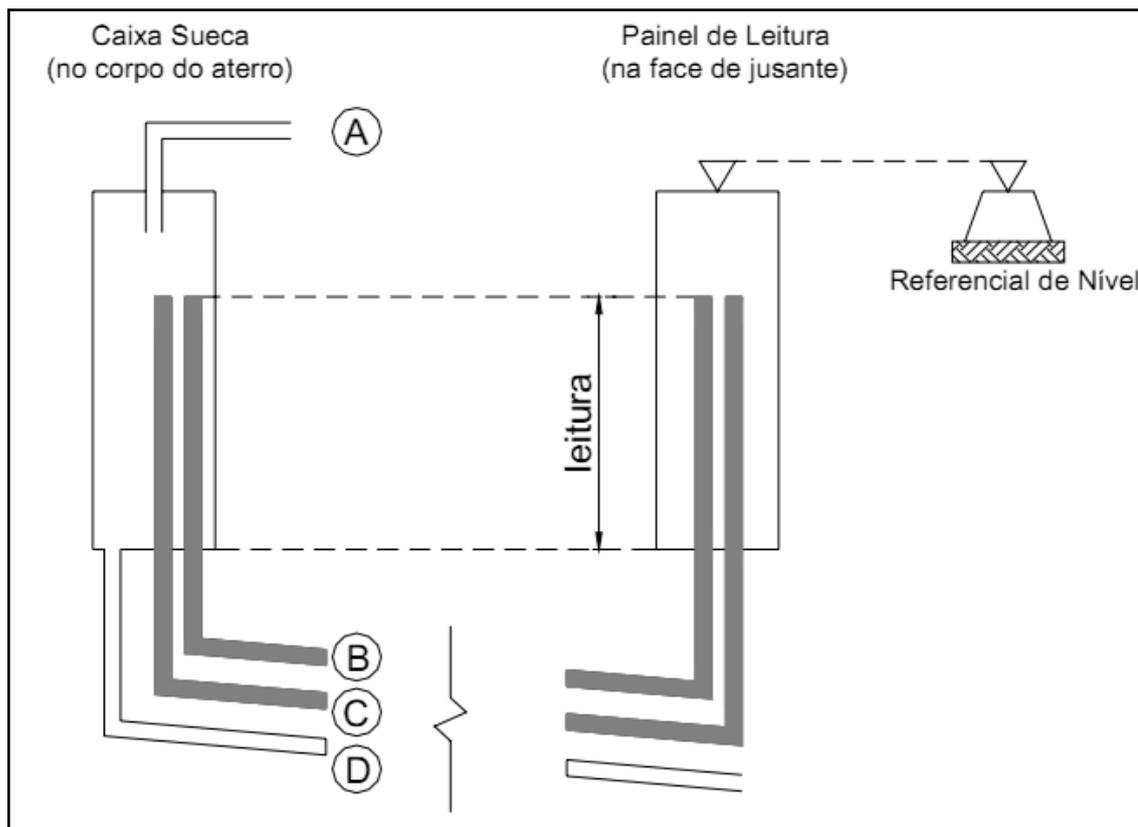


FIGURA 2.9. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MEDIDOR HIDROSTÁTICO DE RECALQUE (OLIVEIRA E SAYÃO, 2004).

O tubo “A”, ou tubo de aeração é responsável pela manutenção da pressão atmosférica dentro da caixa sueca. Quando instalado em barragens de terra, este tubo deve ser levado até o painel de leituras, entretanto em barragens de enrocamento não há esta necessidade, uma vez que os vazios do enrocamento permitem a manutenção da pressão atmosférica.

Os tubos “B” de leitura e “C” de circulação, no início do emprego deste instrumento, eram um único tubo. Com o avanço da técnica, adotou-se configurações com dois tubos para verificar a ocorrência de bolhas de ar na tubulação e outras causas de erros de leitura. Estes tubos são utilizados para circulação de água destilada e deaerada no sistema. Pelo princípio dos vasos comunicantes, e com a pressão atmosférica mantida na caixa sueca pelo tubo de

aeração, garante-se que o nível de água fique estabilizado no painel de leitura, enquanto não ocorrerem deslocamentos verticais no maciço.

O tubo “D”, ou tubo de drenagem, tem a função de escoar o excesso de água que por acaso ocorra dentro da caixa sueca. Em barragens de terra, este tubo deve ser levado até o painel de leitura para não ocorrer fluxo no maciço, em barragens de enrocamento não há esta necessidade, pois o fluxo não apresentará riscos.

Para mensuração dos recalques, deve ser considerado o deslocamento vertical que o painel de leitura pode sofrer. Este deslocamento é obtido através de nivelamento topográfico em relação um referencial de nível, somado ao recalque da caixa sueca.

Uma questão relevante sobre as caixas suecas refere-se ao diâmetro das tubulações. Dunicliff (1988) considera que o diâmetro ideal é de 6 mm para leitura e circulação. Outros autores mencionam que o tubo de leitura deve ter entre 3 e 4 mm de diâmetro interno, fabricados em nylon, e os tubos de ventilação devem ter entre 6 e 7 mm de diâmetro. No trabalho desenvolvido por Affonso (2004), é descrito que a tubulação interfere no tempo de estabilização das leituras, sendo que para tubos de 4,3 mm de diâmetro interno, o tempo de estabilização foi de aproximadamente 5 minutos. Já para tubos de 6,4 mm de diâmetro interno, o tempo reduziu para cerca de 3 minutos.

A confiabilidade deste tipo de instrumentação está diretamente associada à garantia da integridade do conjunto. A qualidade dos materiais que compõem o equipamento como tubos, mangueiras, conexões, são de fundamental importância para o funcionamento do instrumento. Os tubos devem possuir declividade superior

a 5% da caixa até a cabine de leitura. Este procedimento evita a formação de bolhas de ar no interior dos tubos (FONSECA, 2003).

2.3.2.2 Medidor de recalque de hastes tipo KM

Os medidores de recalque tipo KM foram estudados pioneiramente por Komesu e Matuoka, técnicos da Companhia Energética de São Paulo (CESP), que deram origem a denominação ao instrumento. O medidor é composto por um sistema de hastes conjugadas que são acopladas a placas metálicas na profundidade onde se deseja conhecer os recalques (Figura 2.10).

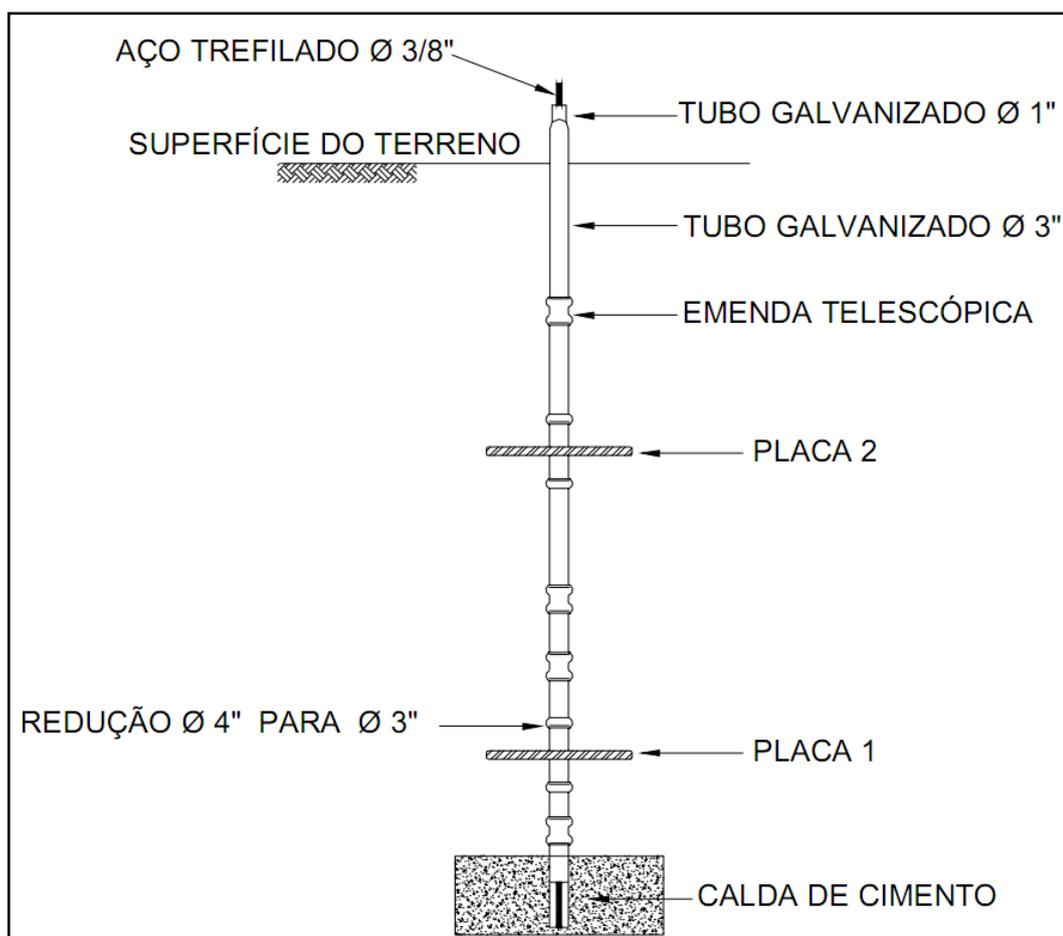


FIGURA 2.10. MEDIDOR DE RECALQUES TIPO KM (CRUZ, 2004)

A instalação em campo é iniciada pelo chumbamento, em rocha sã, de um tubo de aço galvanizado de 25 mm de diâmetro, onde serão referenciados os

recalques de cada conjunto placa/haste. À medida que o aterro é executado, são instaladas as placas acopladas as hastes, com 10 mm de diâmetro, verticalmente no aterro e protegidas externamente por uma tubulação metálica dotada de luvas telescópicas, para absorver as deformações do aterro. Nos primeiros medidores de recalque tipo KM os recalques eram referenciados ao tubo externo, que não era dotado de luvas telescópicas. Assim, os recalques do aterro arrastavam essa tubulação, provocando um provável esmagamento da composição e perda de referência dos recalques do aterro (SILVEIRA, 2006 e FONSECA, 2003).

As medidas são efetuadas com a utilização de um paquímetro adaptado para o instrumento, onde os recalques das várias placas são transmitidos até a superfície do terreno pelas hastes. Estas hastes, podem se movimentar livremente dentro de um tubo guia de proteção e os recalques são medidos em relação ao tubo central de referência, que é fixado à rocha de fundação. A precisão dos recalques medidos está diretamente ligada à precisão do paquímetro utilizado, que é da ordem de $\pm 1,0$ mm. Cada medidor de recalque tipo KM, podem conter até 12 placas e por consequência 12 hastes. A prática recomenda que as hastes sejam pintadas com cores diferentes para evitar possíveis trocas de identificação durante a instalação. A Figura 2.11 ilustra o instrumento.

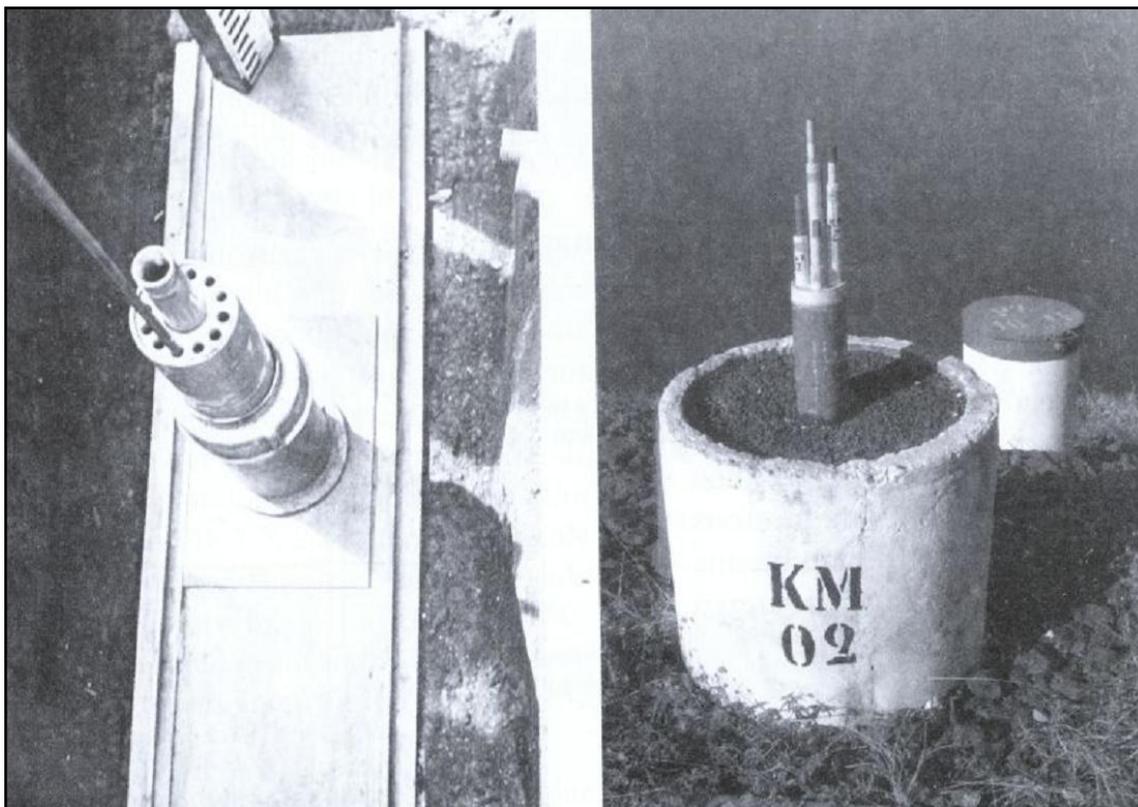


FIGURA 2.11. MEDIDOR DE RECALQUES TIPO KM (SILVERIA, 2006)

2.3.2.3 Medidor de recalque telescópico IPT

O medidor de recalque telescópico foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, de onde surgiu a denominação *IPT*. Este instrumento consiste em um tubo de aço galvanizado de 25,4 mm de diâmetro, chumbado em rocha sã, que na prática é considerado como um local incompressível, e de placas acopladas a tubos de maiores diâmetros, formando uma espécie de telescópio. Geralmente são instalados com no máximo 3 a 4 placas, devido ao crescente aumento de diâmetro das hastes. Estes diâmetros são de aproximadamente 25,4 mm para a haste de referência, 50,8 mm para segunda placa, 73,2 mm para terceira placa e 97,6 mm para quarta placa e assim sucessivamente, da maneira em que constitua um sistema de telescópio de hastes, onde cada uma destas pode se deslocar vertical e livremente em relação às demais (Figura 2.12).

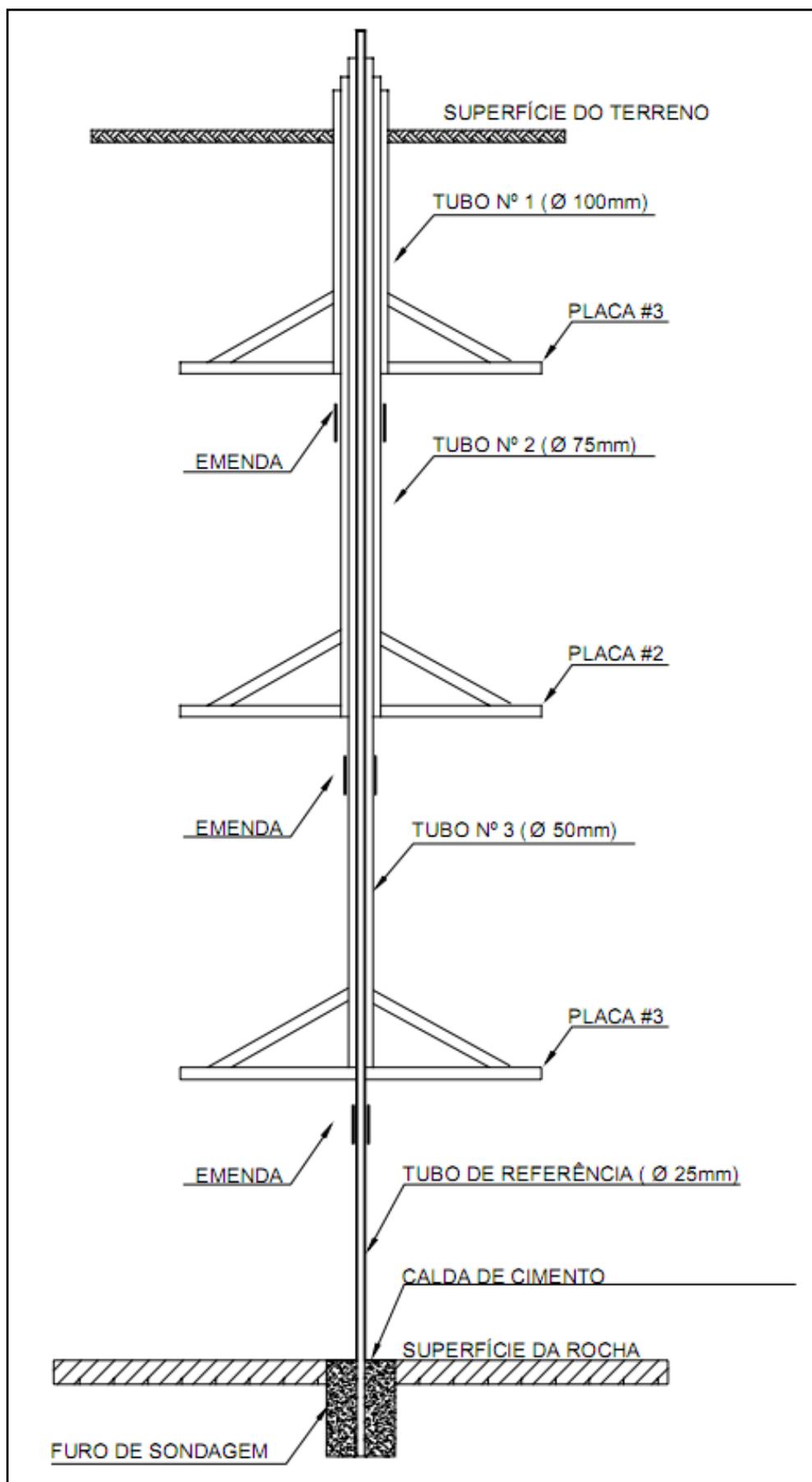


FIGURA 2.12. MEDIDOR DE RECALQUE TELESCÓPICO (CRUZ, 2004)

As leituras de recalque são determinadas com um compasso de pontas secas. Para isto, na extremidade superior de cada tubo é feito um puncionamento. Este puncionamento tem a função de posicionar as pontas secas do compasso no tubo de referência (ϕ 25,4 mm) e no tubo correspondente a cada placa em que está sendo medido o recalque. As distâncias entre as pontas do compasso são medidas numa escala milimetrada.

Cruz (2004) cita que as principais vantagens deste tipo de instrumento são a facilidade de construção e de leituras de recalque, a durabilidade e a confiabilidade. Como limitações, o autor ainda cita:

- Número limitado de placas;
- Diferença entre contas entre placas consecutivas, em função do atrito lateral e consequentes tensões de compressão no tubo externo;
- Interferência na praça (local de instalação);
- Manuseio das placas devido ao peso;
- Dispersão de leituras da ordem de milímetros; e
- Custo.

A Figura 2.13 abaixo ilustra um medidor de recalques tipo *IPT* instalado em uma barragem de terra.



FIGURA 2.13. MEDIDOR DE RECALQUES TIPO IPT (CRUZ, 2004)

2.3.2.4 Medidor magnético de recalque (*Idel*)

Este instrumento também é conhecido como medidor de recalque tipo *Idel*, que foi o idealizador deste instrumento. É constituído por um conjunto de anéis magnéticos dispostos ao longo de um tubo de PVC vertical, com emendas telescópicas, conforme ilustrado na Figura 2.14. As leituras são realizadas a partir de uma sonda ou torpedo de leitura que desce ao longo do tubo de PVC, suspenso por uma trena metálica milimetrada. Ao atingir a posição do ímã de um anel, o campo magnético aciona um contato existente dentro do sensor. Esta condição é percebida pelo operador através do deslocamento do ponteiro de um galvanômetro, ou de sinal um sonoro emitido por um circuito apropriado.

Os medidores de recalque tipo magnético, também são designados por extensômetro de sonda magnética, pois podem ser instalados ao longo de planos horizontais, ou qualquer outra direção ao longo de extensões de até 200 m.

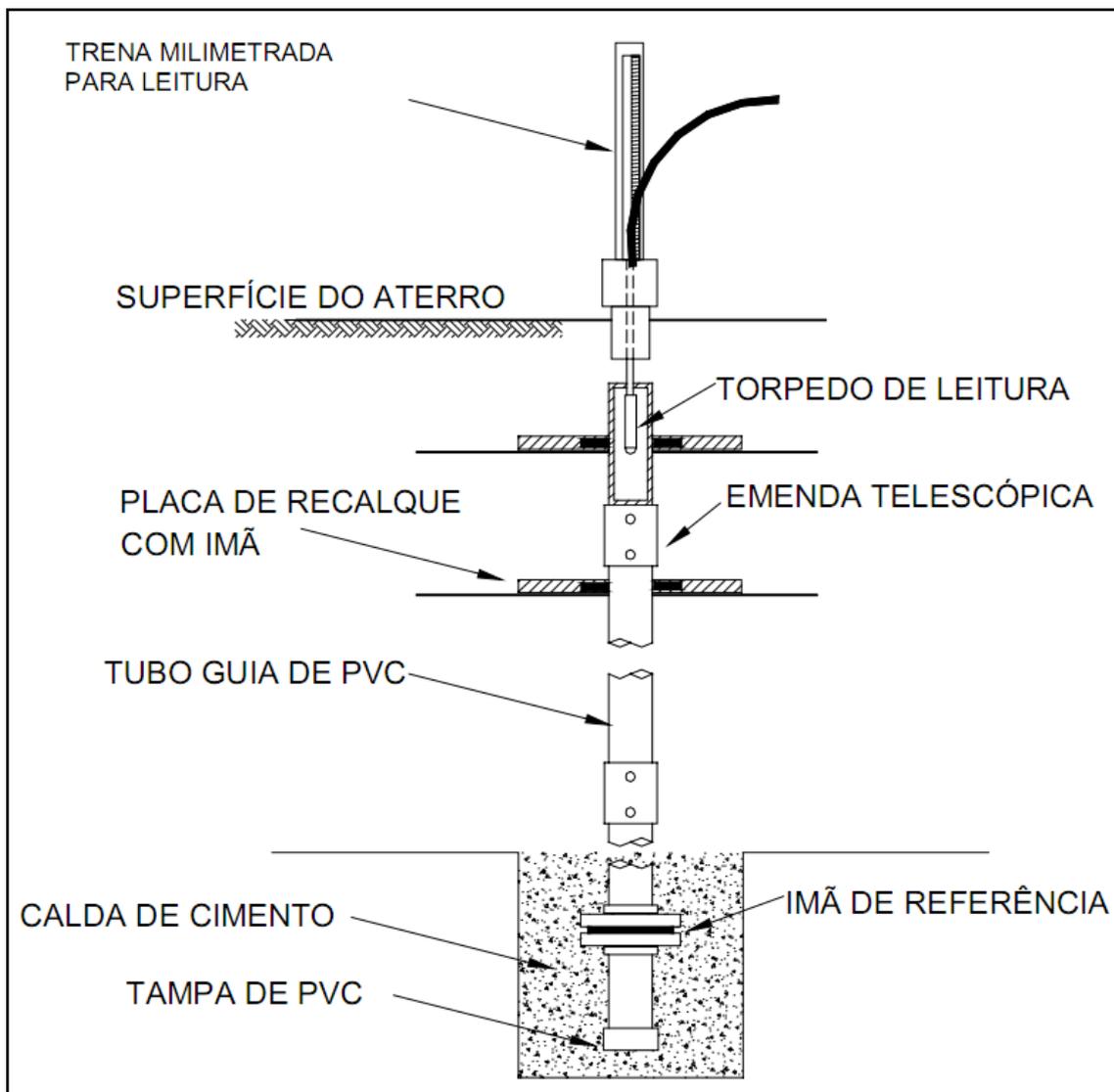


FIGURA 2.14. MEDIDOR MAGNÉTICO DE RECALQUE (CRUZ, 2004)

Cada anel magnético permite pelo menos dois pontos de leitura, uma acima e outra abaixo da placa, podendo-se optar pelo uso do ponto superior, ou pelo inferior, ou ainda adotando-se a média entre os dois pontos, que são referenciados pela extremidade superior do tubo de PCV. A extremidade inferior deste tubo deve estar posicionada em rocha, a fim de se dispor de um referencial fixo.

Algumas das vantagens deste tipo de instrumento é a possibilidade da instalação de um número ilimitado de placas ou anéis de recalque, simplicidade, confiabilidade e baixo custo (SILVEIRA, 2006). Como limitação pode-se citar o tempo de leitura relativamente demorado.

2.3.2.5 *Inclinômetros*

Os inclinômetros são instrumentos utilizados para medir deslocamentos horizontais superficiais e subsuperficiais. São empregados na engenharia geotécnica para avaliação da estabilidade de taludes em barragens, obras rodoviárias, escavações a céu aberto, obras de mineração, encostas naturais e etc.

O instrumento consiste em um torpedo (Figura 2.15) dotado de um pêndulo interno, os mais antigos, e de acelerômetros, os mais recentes que permitem uma sensibilidade maior do que o anterior.

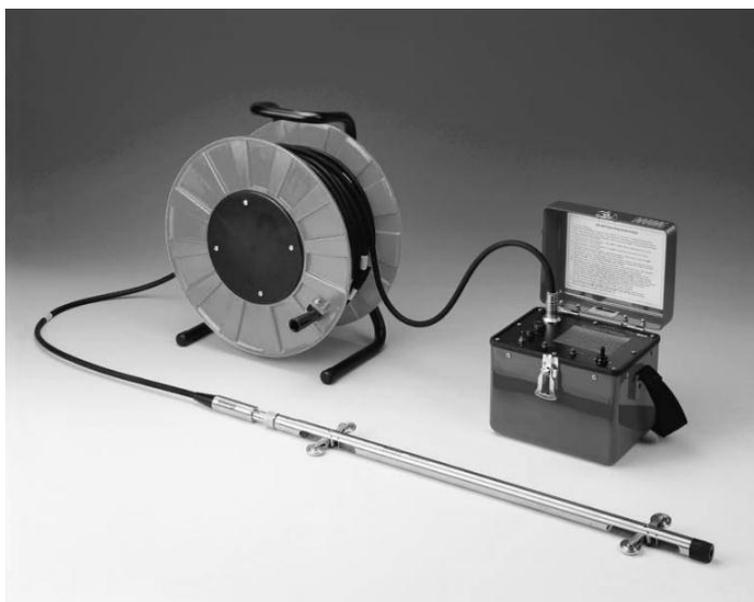


FIGURA 2.15. TORPEDO DE INCLINÔMETRO, BOBINA COM CABO E UNIDADE LEITORA
([HTTP://WWW.GEOKON.COM](http://www.geokon.com))

Além de medir movimentos horizontais, os inclinômetros podem detectar regiões com concentração de deformações, isto é, superfícies potenciais de ruptura, estando capacitados para tal.

Para medida dos deslocamentos horizontais é instalado no terreno um tubo-guia tendo por base um referencial fixo, preferencialmente o topo rochoso. Estes tubos, constituídos de alumínio ou PVC, possuem quatro ranhuras perpendiculares

entre si e diametralmente opostas (Figura 2.16). Quando instalados em furos de sondagem, o espaço entre o furo e os tubos não deve ser preenchido com areia, pois causam maiores dispersões nos resultados (CRUZ, 2004 e SILVEIRA, 2006). Recomenda-se que o espaço vazio seja preenchido com uma mistura de cimento e bentonita na proporção de 1:10. A Figura 2.17 apresenta a sequência de instalação do tubo-guia.

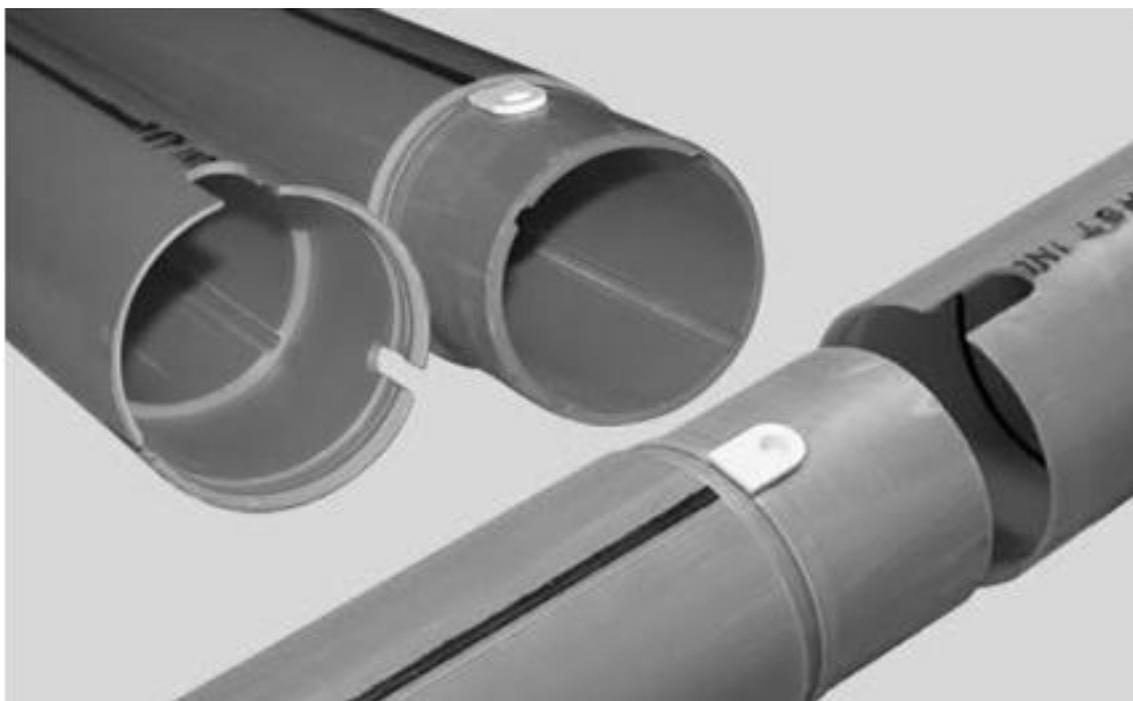


FIGURA 2.16. TUBO-GUIA DE INCLINÔMETRO ([HTTP://WWW.GEOKON.COM](http://www.geokon.com))

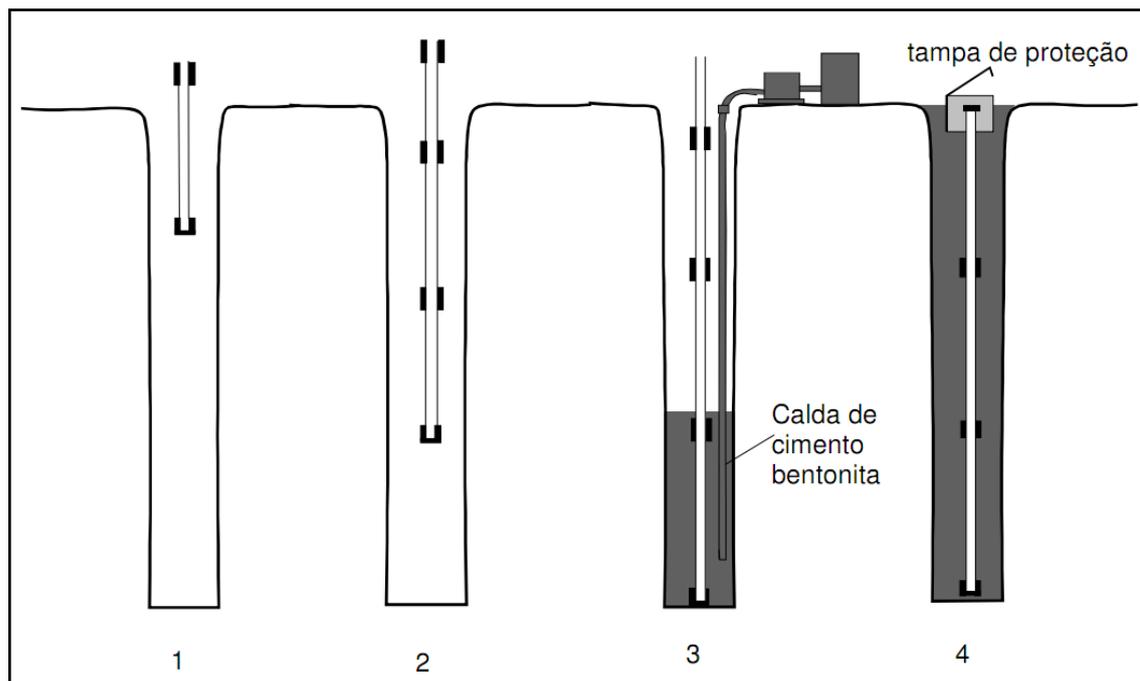


FIGURA 2.17. SEQUÊNCIA DE INSTALAÇÃO DO TUBO-GUIA

Os primeiros inclinômetros, da série 200B da *Slope Indicator*, criadores deste instrumento em 1974, apresentavam um pêndulo em que o deslocamento era medido pela variação de uma resistência elétrica (ponte de *Wheatstone*). A sensibilidade era da ordem de 1:1.000, que permitia medir deslocamentos angulares de 1 mm/m. Com o avanço tecnológico, os inclinômetros passaram a ser construídos com acelerômetros para determinação dos deslocamentos angulares, os quais permitiram uma sensibilidade 10 vezes maior, de 1:10.000, correspondente a um deslocamento angular de 0,1 mm/m. O inclinômetro apresentado na Figura 2.15, modelo 6000 da *Geokon*, apresenta sensibilidade de $\pm 0,05$ mm/m.

A direção das ranhuras do tubo-guia deve ser instalada nas direções onde se pretendem obter os deslocamentos. Em barragens, são instalados de maneira que as direções medidas dos deslocamentos horizontais coincidam com as direções paralelas e perpendiculares ao eixo da barragem. Assim, a partir da composição de movimentos, pode-se determinar a direção geral dos deslocamentos resultantes em cada ponto de medida.

Os tubos-guia são geralmente comercializados com diâmetros de 70 mm e 85 mm. Os tubos de maior diâmetro oferecem vida útil mais longa e são recomendados para planos de instrumentação de longo prazo e para regiões com zonas cisalhantes concentradas (delgadas) ou múltiplas. São também recomendados para instalação ao longo da horizontal. Os tubos de menor diâmetro são mais apropriados para empreendimentos em que são antecipados deslocamentos de intensidade moderada (SILVEIRA, 2006).

As operações de leituras de deflexão do inclinômetro são obtidas introduzindo o torpedo no tubo-guia até a base e, após a estabilização à temperatura ambiente (cerca de 10 a 20 minutos), o mesmo é puxado até o nível do terreno. Isto é possível através do cabo de ligação que passa por uma polia no topo do furo (para centralização do cabo e do torpedo) e por uma catraca que permite a fixação do cabo e impede a queda da sonda dentro do tubo guia, conforme a ilustração apresentada na Figura 2.18.

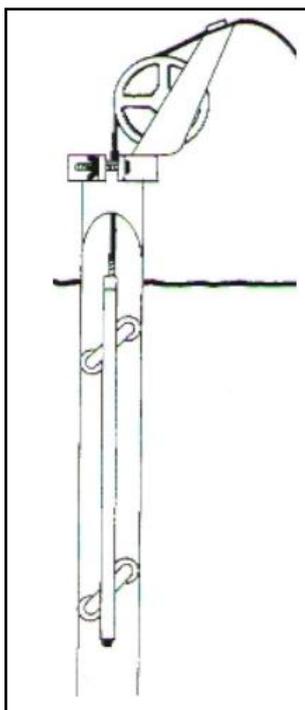


FIGURA 2.18. ESQUEMA MOVIMENTAÇÃO DO TORPEDO NO TUBO-GUIA

O ângulo de inclinação e desvio lateral do torpedo, e , conseqüentemente do tubo-guia é determinado entre duas leituras consecutivas, em geral, a cada 0,5 m – intervalo de medida “L” (distância entre as rodinhas do torpedo), conforme ilustrado na Figura 2.19. Os deslocamentos do maciço são calculados através da Equação 2.1:

$$\delta_L = L \sum \text{sen } \theta \quad (\text{Equação 2.1})$$

Onde:

- δ_L – Deslocamento em mm;
- L – Distância entre leituras consecutivas, em mm; e
- θ – Ângulo de inclinação.

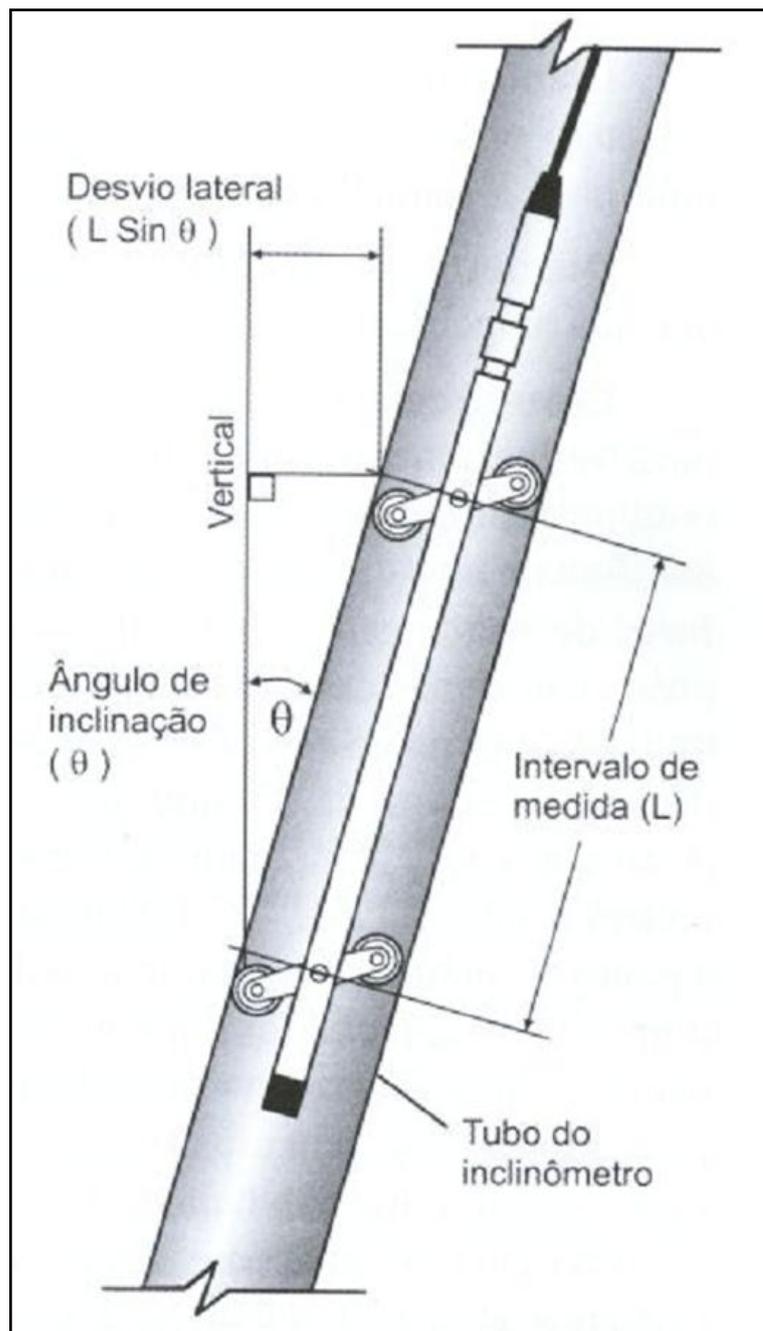


FIGURA 2.19. ÂNGULO DE INCLINAÇÃO E DESVIO LATERAL (CATÁLOGO SINCO)

Desta forma, a mudança da curvatura do tubo-guia é acompanhada ao longo do tempo e, quando há uma superfície de escorregamento, esta será claramente identificada. As leituras são convertidas em registros dos deslocamentos perpendiculares ao eixo vertical. Estes dados são lançados em gráficos, para se quantificar o deslocamento de cada trecho em relação ao eixo vertical, tomando-se como base a primeira campanha de leituras do instrumento, conforme um exemplo

ilustrado na Figura 2.20. Nesta figura, são apresentadas as direções ortogonais do tubo-guia, representados pelos gráficos “Direção A” e “Direção B”. A direção resultante do movimento pode ser obtida por trigonometria a partir dos deslocamentos da Direção A e da Direção B. Pode-se observar na Figura 2.20 a superfície potencial de ruptura próximo aos 25 metros de profundidade, onde há um crescente deslocamento ocasionado por movimentação de massa.

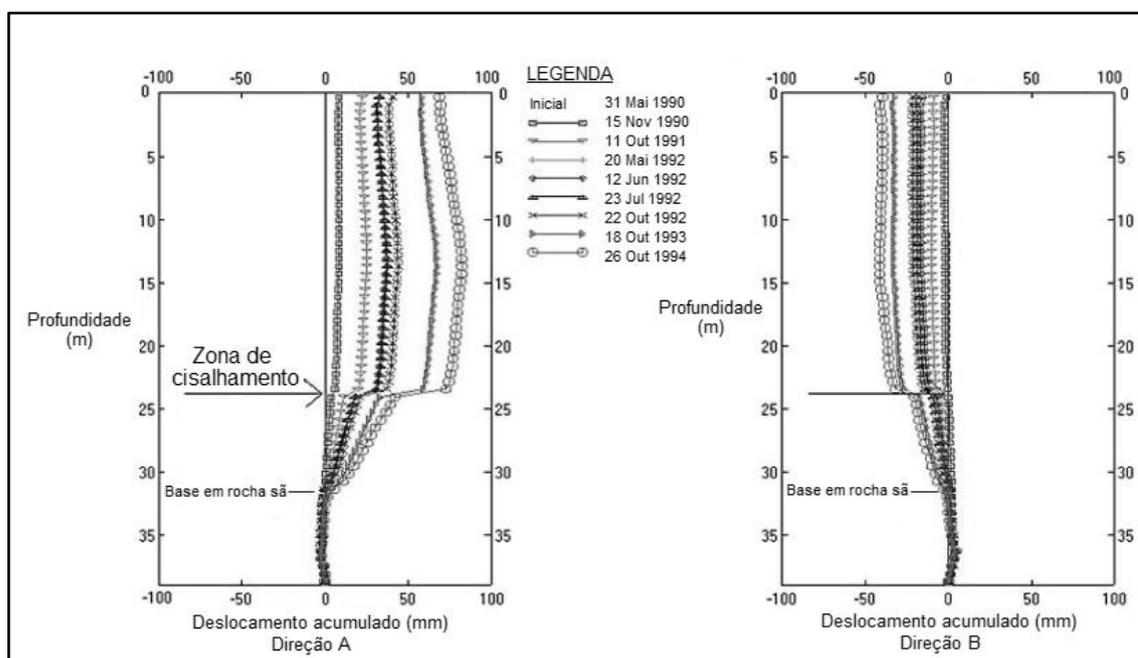


FIGURA 2.20. RESULTADO GRÁFICO DE INCLINÔMETRIA (FONTE: GEOKON)

2.3.2.6 Fita de cisalhamento

A instrumentação com fitas de cisalhamento consiste em instalar estas fitas em furos de sondagens e os movimentos são percebidos quando há um deslocamento cisalhante concentrado, ao longo de um plano de ruptura que provoque o seccionamento de uma ou mais fitas, conforme ilustrado na Figura 2.21.

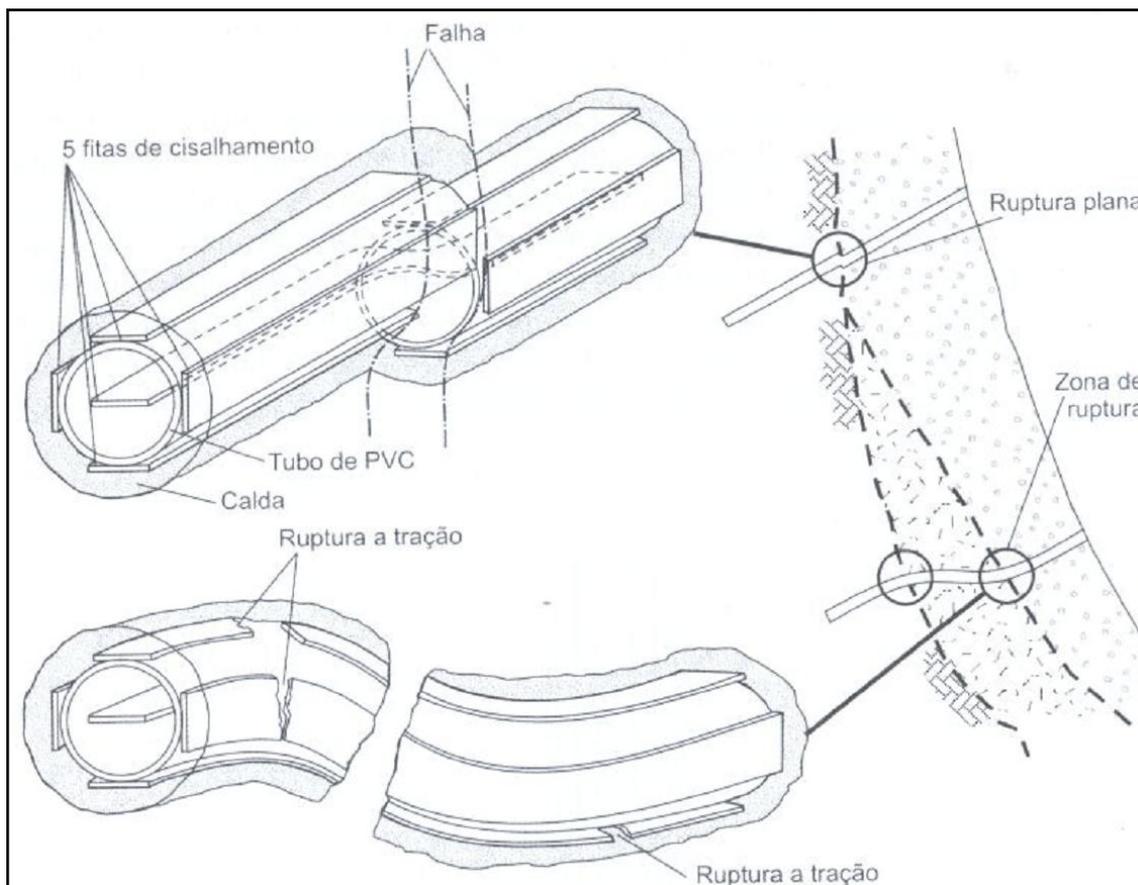


FIGURA 2.21. PRINCÍPIOS DE INSTALAÇÃO E FUNCIONAMENTO DAS FITAS DE CISALHAMENTO (SILVEIRA, 2006)

As fitas de cisalhamento são constituídas por um circuito elétrico e conectadas a uma ponte de *Wheatstone*, dotadas de uma série de resistências elétricas espaçadas a cada 30 cm. Quando ocorre ruptura de uma fita, o circuito elétrico é interrompido, desta forma pode-se determinar a profundidade em que ocorreu o seccionamento e, portanto, a localização da superfície de cisalhamento. Em um furo de sondagem de 76 mm de diâmetro (furo de sondagem NX), podem ser instalados até nove fitas com comprimentos de até 60 m. A instalação pode ser realizada no interior de tubos de PVC com 50 mm de diâmetro, preenchendo o espaço vazio com calda de cimento (SILVEIRA, 2006).

O monitoramento da zona de cisalhamento com fitas de cisalhamento trata-se de um sistema similar ao desenvolvido nesta dissertação. Entretanto com a

tecnologia de fibra óptica o movimento é percebido não somente com a ruptura do cabo, mas também com pequenas deformações na fibra.

Uma das desvantagens da instrumentação com fitas de cisalhamento é o fato de que não é possível detectar movimentos que não provoquem o seccionamento da fita e também de não se pode estimar a ordem de grandeza dos deslocamentos no maciço.

2.4 TECNOLOGIA DE FIBRA ÓPTICA

Este item apresentará uma sucinta revisão bibliográfica sobre os sensores de fibra óptica em aplicações geotécnicas. Será descrita uma breve introdução dos sensores capazes de detectar deformações com a fibra óptica, também conhecida como tecnologia DTSS (*Distributed Temperature and Strain Sensing* – Sensor Distribuído de Temperatura e Deformação). Consta ainda neste item a discussão de algumas pesquisas recentemente desenvolvidas envolvendo a tecnologia de fibra óptica nos laboratórios do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC).

2.4.1 A fibra óptica – Generalidades



FIGURA 2.22. FIBRA ÓPTICA

A fibra óptica é um dos componentes mais importantes dos sistemas de comunicação e vem ganhando espaço em outros meios com o avanço tecnológico. Além do uso para comunicação de dados, outras grandezas podem ser transmitidas com fibras ópticas.

A fibra óptica é um meio através do qual a luz pode ser transmitida com mínimas perdas por longas distâncias, seguindo trajetos retilíneos ou curvos. Num sistema típico, um sinal elétrico de interesse é convertido em luz, laser diodo ou diodo emissor de luz (LED). O sinal óptico é então lançado no interior da fibra que se propaga através dela até que seja recebido por um detector, o qual converte o sinal óptico novamente em sinal elétrico.

Segundo Keiser (1991), os materiais constituintes da fibra óptica devem apresentar algumas características como:

- Deve ser possível de ser fabricada em grandes comprimentos, pequena espessura e ser flexível;
- O material deve ser transparente a comprimentos de ondas ópticas para que a luz seja guiada de forma eficiente, ou seja, para que não ocorram perdas ópticas na transmissão das informações;
- Os materiais devem ser fisicamente compatíveis com índices de refração ligeiramente diferentes entre o núcleo (*core*) e o revestimento primário (*cladding*).

Observa-se que os materiais que satisfazem as características descritas pelo autor são plásticos e vidros. Preferencialmente, o vidro é empregado como material constituinte, podendo ser sílica (SiO_2) ou um silicato. Esta preferência se dá ao fato de que o vidro possibilita a transmissão da luz por grandes distâncias, característica esta não observada nas fibras constituídas de materiais plásticos. A Figura 2.23 ilustra os componentes de uma fibra óptica.

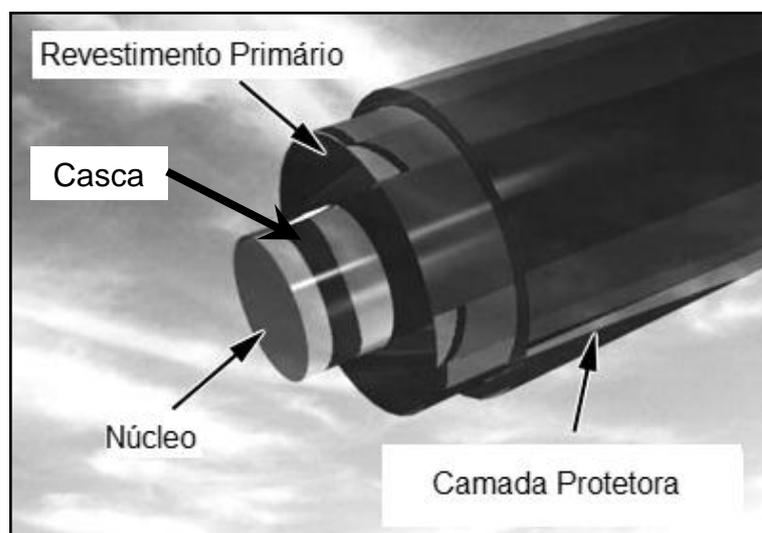


FIGURA 2.23. DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DA FIBRA (FREUDENRICH, 2009)

A propagação da luz na fibra óptica é possível devido à reflexão interna total, que ocorre na interface entre duas regiões no interior da fibra, o núcleo e a camada que o envolve, denominada casca (*cladding*). A função do núcleo é transmitir o sinal

de luz, enquanto a casca, devido à diferença do índice de refração, deve manter o sinal viajando no interior do núcleo por reflexão total. Há ainda um terceiro componente, como se pode observar na Figura 2.23, a primeira camada não óptica, constituída de uma ou mais camadas finas de polímero, o revestimento primário, com objetivos principais de proteção mecânica e reforço da fibra. Algumas fibras ópticas têm uma camada protetora ou o “*buffer*”, em adição ou substituição ao revestimento. Este material fornece resistência à abrasão e reduz perdas devidas à presença de imperfeições microscópicas na geometria da fibra óptica, resultantes do processo de fabricação. Um cabo de fibra óptica pode conter uma ou mais fibras e estas podem ser do tipo monomodo e/ou multimodo. Segundo Bailey (2003) uma das principais características do cabo de fibra óptica é que devem apresentar propriedades suficientes para suportarem a ação de agentes externos (proteção mecânica, facilidade de manuseio, proteção quanto a riscos ambientais e não serem condutivos), tanto durante a instalação como ao longo de sua vida operacional.

2.4.1.1 *Fibra óptica monomodo*

A fibra óptica monomodo tem um diâmetro do núcleo de 4 μm a 10 μm . Devido a esta pequena dimensão, em comparação com o comprimento da onda de luz que viaja através da fibra, a luz só pode viajar em um caminho único ou de um único modo (Figura 2.24). Fibras monomodo são utilizadas nas telecomunicações e geralmente operam em 1300 nm e 1550 nm de comprimento de onda.

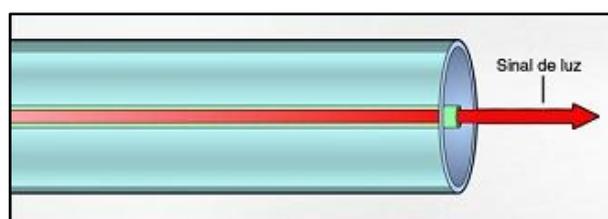


FIGURA 2.24. FIBRA ÓPTICA MONOMODO

2.4.1.2 Fibra óptica multimodo

A fibra óptica multimodo tem um diâmetro maior do núcleo, quando comparada com a fibra monomodo, entre 25 μm e 150 μm , e, portanto, a luz pode viajar em muitos caminhos ou modos diferentes (Figura 2.24). Estes tipos de fibras são geralmente utilizados em redes de área local (LAN) e operam em 850 nm ou 1300 nm de comprimento de onda.

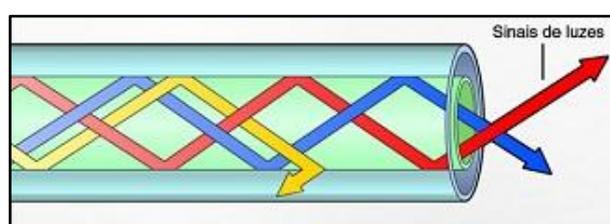


FIGURA 2.25. FIBRA ÓPTICA MULTIMODO

2.4.2 Princípios físicos da tecnologia de fibra óptica

A velocidade da propagação da luz em espaço livre é de aproximadamente 3×10^8 m/s. A direção do curso da luz é modificada por reflexão, refração, e etc., em superfícies ou em interface entre dois meios diferentes.

O fenômeno na reflexão consiste na mudança da direção da propagação da luz. Este fato deve-se a luz voltar a se propagar no meio de origem, após incidir sobre um objeto ou superfície. A refração da luz é a mudança na direção de uma onda ao atravessar a fronteira entre dois meios com índices de refração diferentes. A refração modifica a velocidade de propagação e o comprimento da onda da luz. A reflexão interna total se dá quando um raio de luz é dirigido de um meio com índice de refração n_1 , para a superfície de um meio com índice de refração n_2 e incide a um ângulo maior que o ângulo crítico, medido em relação à normal traçada à superfície no ponto de incidência do raio de luz, sendo $n_1 > n_2$ (Figura 2.26).

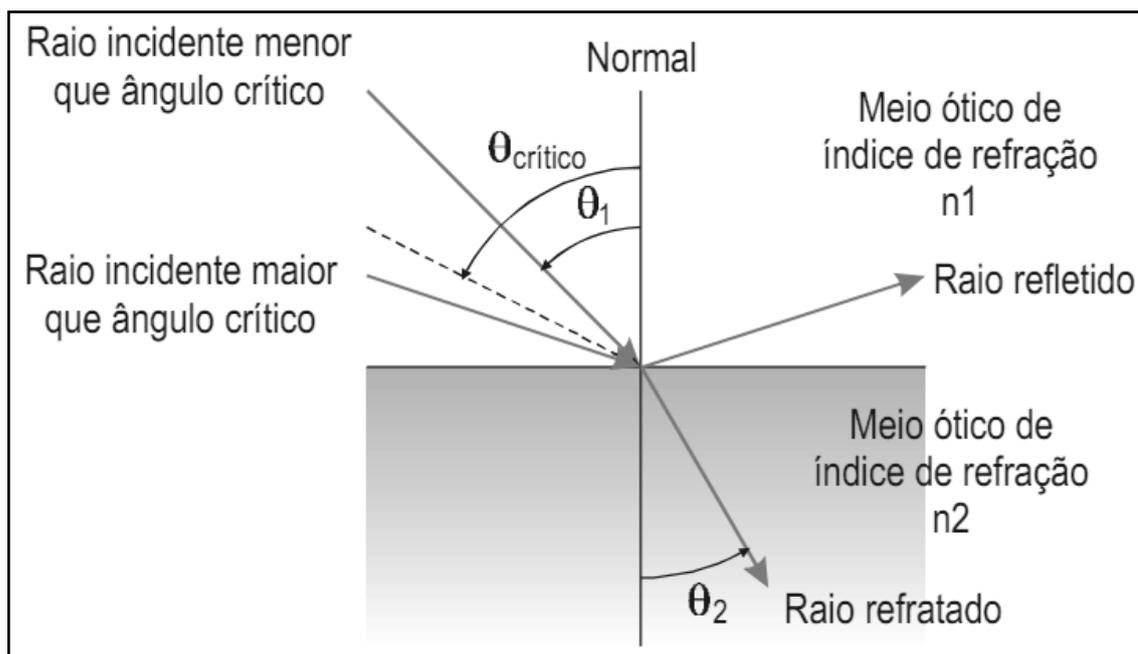


FIGURA 2.26. EXEMPLO DE REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ (SANTOS, 1999)

Na Figura 2.27 são ilustrados os fenômenos da reflexão e refração em uma fibra óptica, nota-se que parte da luz é perdida quando o ângulo de incidência da luz está fora do ângulo de aceitação. Quando a luz viaja de um meio com um índice de refração elevado para um meio com um índice de refração inferior, aumentando o ângulo de incidência irá resultar em um aumento ainda maior no ângulo de refração. Quando o ângulo de refração resultar em 90°, este é conhecido como *ângulo crítico*. O ângulo crítico pode ser calculado pela lei de *Snee!* **Erro! Fonte de referência não encontrada.**):

$$n_1 \times \text{sen } \theta_1 = n_2 \times \text{sen } \theta_2 \quad (\text{Equação 2.2})$$

Para ângulos maiores que o ângulo crítico, a luz é totalmente refletida, fazendo com que o sinal permaneça viajando pelo núcleo. Para ângulos menores, a luz é refratada e, uma vez fora do núcleo, é absorvida pela casca ou outra camada protetora. Em alguns casos, o sinal pode continuar propagando-se na casca, em outros, pode ser perdido.

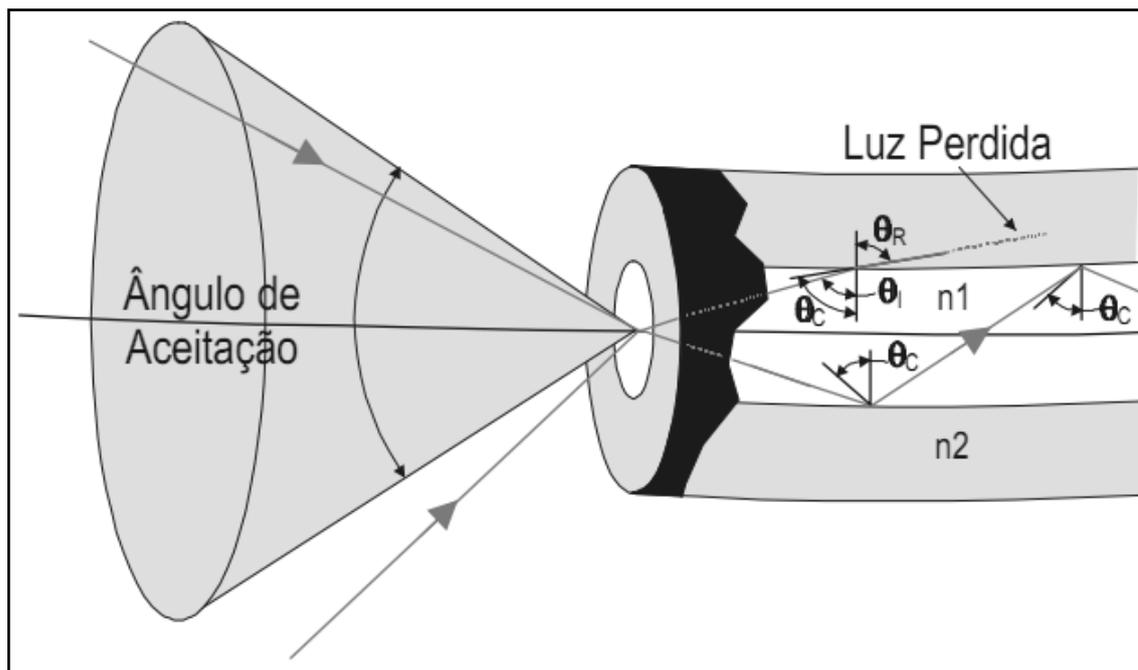


FIGURA 2.27. PROPAGAÇÃO DA LUZ NA FIBRA ÓPTICA (SANTO, 1999)

2.4.3 Conexões de fibra óptica

A união entre duas fibras pode ser temporária, através de conectores, ou permanente, através de emenda por fusão. A ligação deve ser mecanicamente suficiente para resistir esforços de tração e flexão. O núcleo da fibra deve se encaixar perfeitamente para permitir a passagem do raio de luz. Para união permanente ou por fusão, a fibra deve ser preparada e isto, inclui a decapagem e clivagem. Para união temporária, existe no mercado uma grande variedade de tipos de conectores. A Figura 2.28 ilustra os equipamentos necessários para união permanente entre duas fibras ópticas. A seguir encontra-se apresentado nos itens 2.4.3.1 e 2.4.3.2 o procedimento para fusão permanente de fibras ópticas.

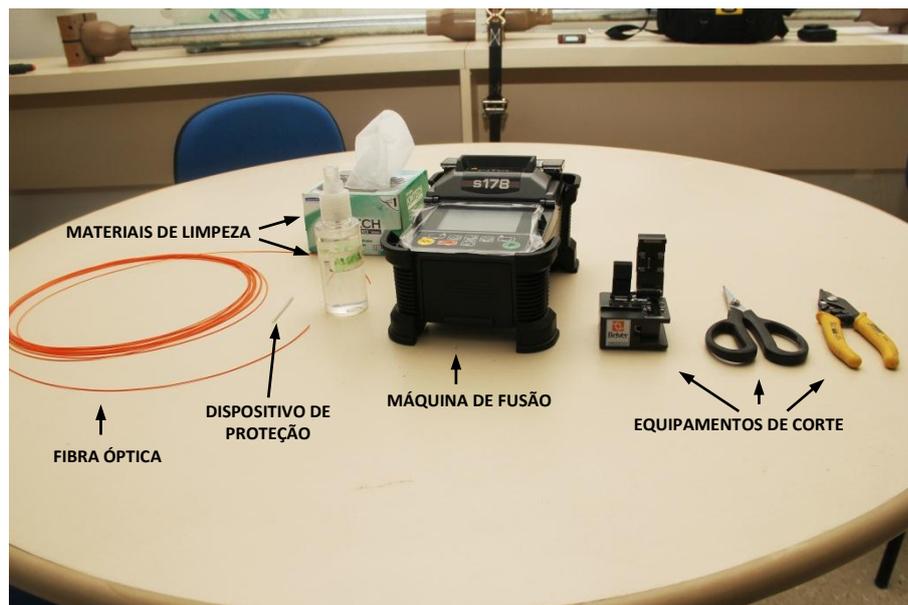


FIGURA 2.28. EQUIPAMENTOS PARA FUSÃO DE FIBRAS ÓPTICAS

2.4.3.1 Decapagem e clivagem

A decapagem refere-se à remoção de todas as camadas em torno do núcleo e do revestimento. Uma ferramenta específica de extração, como um alicate desencapador de fios ilustrado na Figura 2.29, deve ser utilizada para remover o revestimento primário da fibra óptica.



FIGURA 2.29. ALICATE PARA REMOÇÃO DO REVESTIMENTO PRIMÁRIO DA FIBRA ÓPTICA

O revestimento primário da fibra óptica deve ser removido em uma distância de aproximadamente 15 mm da extremidade da fibra (Figura 2.30).

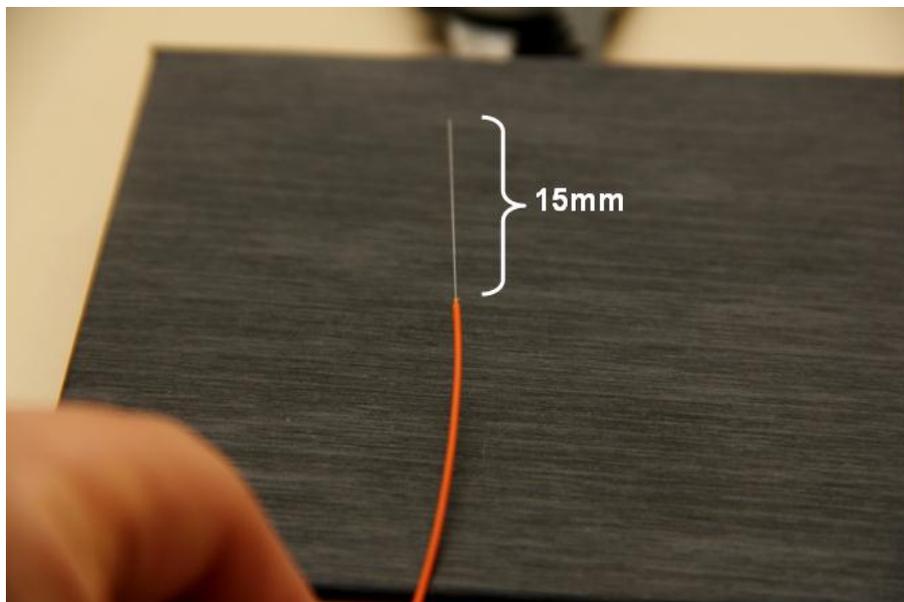


FIGURA 2.30. REVESTIMENTO PRIMÁRIO DA FIBRA ÓPTICA

Existem produtos químicos, tais como o cloreto de metileno, que também podem ser utilizados para o processo de extração. No entanto, estes produtos podem prejudicar o revestimento para aplicações de longa duração.

Na sequência ao que foi apresentado, a fibra deve ser seccionada em um ângulo exato de 90°. Este ângulo de corte é realizado através de um equipamento conhecido como clivador, conforme ilustrado na Figura 2.31.

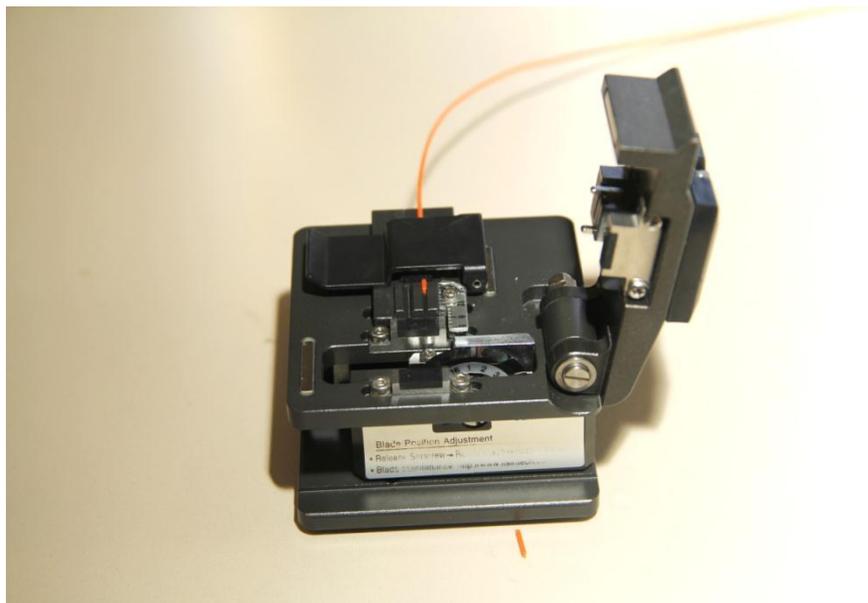


FIGURA 2.31. EQUIPAMENTO DE CORTE DE FIBRAS ÓPTICAS EM ÂNGULOS DE 90° (CLIVADOR)

2.4.3.2 Emendas ou fusão

As uniões permanentes entre duas fibras são feitas por equipamento de fusão de fibras ópticas. Neste equipamento a emenda é realizada por um arco elétrico entre duas fibras alinhadas que aquece a fibra óptica a uma temperatura de 1.100 °C, para formar a junta de fusão (Figura 2.32). O que resulta em uma perfeita fusão de emendas sem a indicação de que este é o resultado de duas fibras unidas.

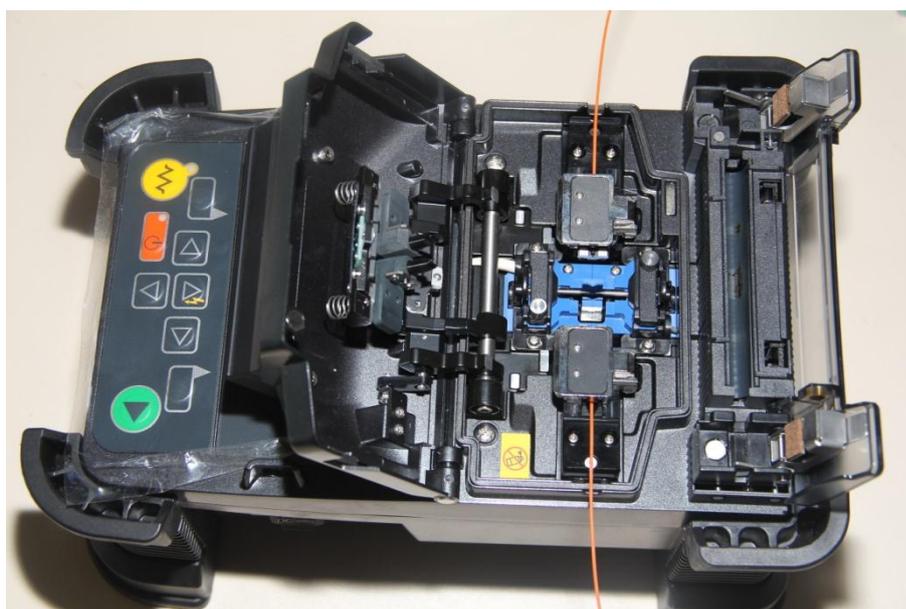


FIGURA 2.32. EQUIPAMENTO DE FUSÃO DE FIBRAS ÓPTICAS

A resistência à tração de uma emenda de fusão é comparável à da fibra original. Entretanto, um dispositivo de proteção, tal como um grampo mecânico ou um termo retrátil é utilizado para substituir a camada protetora da seção removida do revestimento (Figura 2.33).

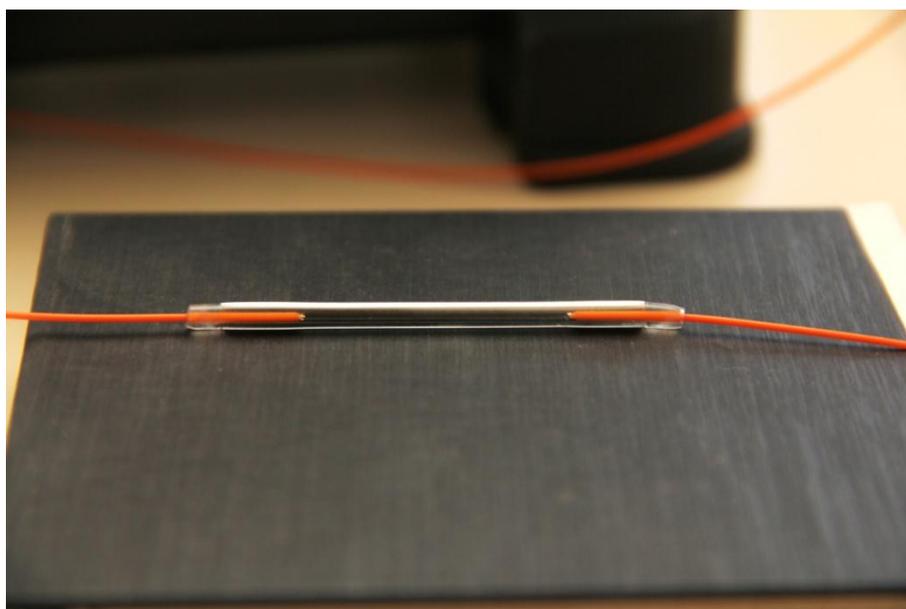


FIGURA 2.33. DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO MECÂNICA APÓS FUSÃO

2.4.3.3 Conectores

Atualmente no mercado existe uma grande variedade de conectores sendo comercializados, os quais são projetados para promover da forma mais adequada a junção entre as terminações da fibra óptica, garantindo assim o alinhamento perfeito entre os núcleos das fibras, além de servir como proteção mecânica. As conexões em fibra óptica têm o objetivo de conectar uma fibra à outra ou conectar uma fibra a um equipamento, possibilitando assim a reconfiguração da comunicação, relocação de equipamentos, ou até mesmo o prolongamento da fibra já existente. As principais diferenças entre os conectores são as suas dimensões e os métodos de acoplamento mecânico.

A Figura 2.34 ilustra 4 tipos de conectores: (a) FC/APC; (b) E2000; (c) FC/PC; e (d) FC/PC.

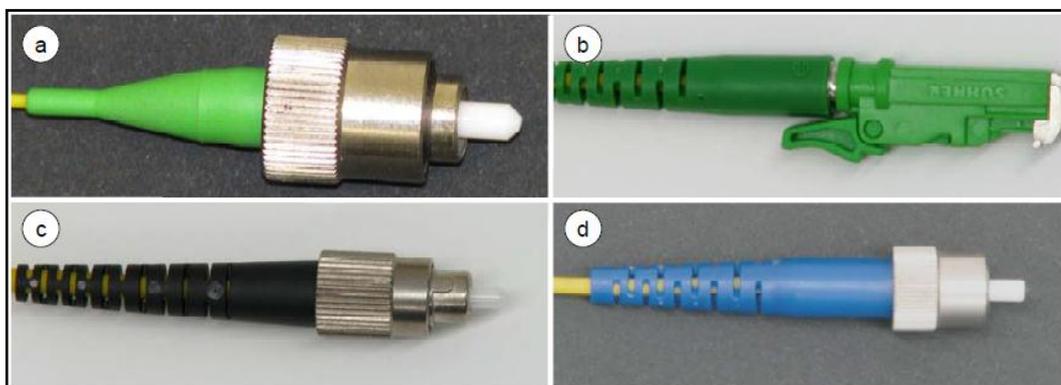


FIGURA 2.34. TIPOS DE CONECTORES DE FIBRA ÓPTICA (ITEN, 2011)

2.4.3.4 *Pigtails*

Como a instalação de um conector é um processo demorado e requer instrumentos especiais e condições de laboratório específicas, o método mais comum é a utilização de *Pigtails* (Figura 2.35). *Pigtails* trata-se de um pedaço curto de fibra óptica aonde um conector já vem instalado nas condições perfeitas de fábrica. Assim a união é realizada através da fusão de duas fibras ópticas, como citado anteriormente.

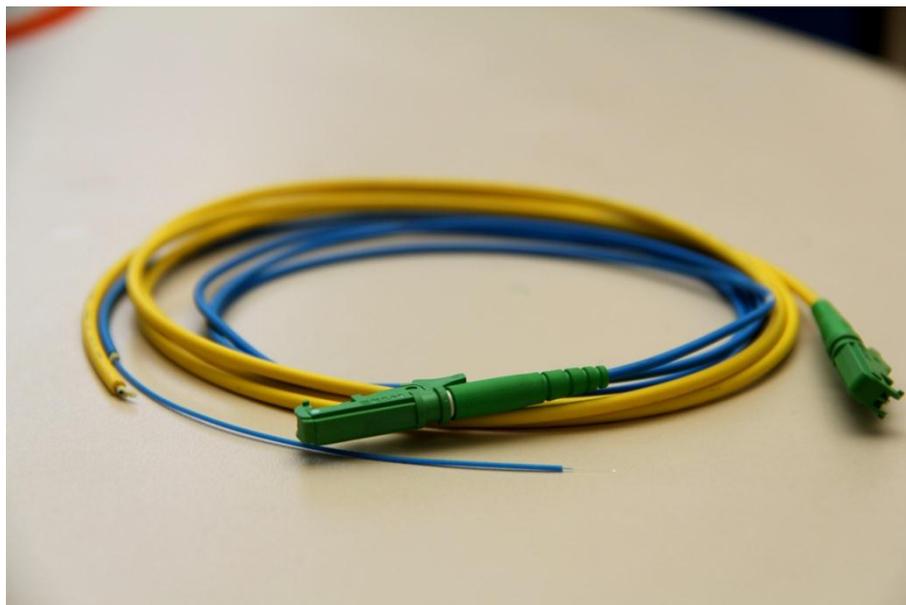


FIGURA 2.35. PIGTAILS

2.4.3.5 *Utilização de conectores ou de emendas por fusão*

Em geral, emendas oferecem uma menor atenuação de sinal do que os conectores, além de serem mais econômicas. No entanto, para certas tarefas as ligações temporárias, por conectores, são mais vantajosas em função do tempo e da flexibilidade para unir duas fibras ópticas (ITEN, 2011).

2.4.4 **Classificação dos sensores de fibra óptica**

Este item não se destina a dar uma descrição detalhada de cada tecnologia, mas sim para servir como uma visão geral das principais tecnologias e questões de implementação sobre sensores desenvolvidos na indústria de fibras ópticas.

Os sensores de fibra óptica (SFO) podem ser classificados de duas formas distintas: os sensores extrínsecos e os sensores intrínsecos. Os sensores extrínsecos são caracterizados por transportarem o feixe de luz até a região sensora, ou seja, a fibra óptica é utilizada apenas como canal óptico de transporte da informação até o local de monitoramento. Quando as propriedades da própria

fibra óptica são utilizadas para converter uma ação externa em modulação do feixe de luz que viaja através dela, configura-se um sensor intrínseco, em outros termos o sensor é a própria fibra óptica (RIBERIO, 1996).

Os sensores de fibra óptica, extrínsecos e intrínsecos, operam através da modulação de uma ou mais características da radiação guiada (intensidade, comprimento de onda ou frequência, polarização e fase) cada uma das quais potencialmente sensíveis em determinadas grandezas físicas. Desta maneira, os sensores podem ser subdivididos em *Sensores de Intensidade* e *Sensores Interferométricos*.

Os sensores de intensidade, em geral, são constituídos de fibras multimodo e são baseados na característica do comprimento de onda. Os sensores interferométricos, que em geral, são constituídos de fibras monomodo, fazem uso das características da modulação de polarização, do comprimento de onda e da fase (GLISIC e INAUDI, 2007). A Tabela 2.2 resume as principais características dos princípios de medição dos sensores de fibra óptica.

TABELA 2.2. CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA (ADAPTADO DE GLISIC E INAUDI, 2007)

	SOFO Interferométrico	Fabry-Perot Interferométrico	Redes de Bragg	Espalhamento de Raman	Espalhamento de Brillouin
Tipo de sensor	Medidas longas (deformação integral)	Pontual	Pontual	Distribuída	Distribuída
Parâmetros medidos	Deslocamento Deformação Inclinação Força	Deformação Temperatura Pressão	Deformação Temperatura Aceleração Nível de água	Temperatura	Deformação Temperatura
Multiplexagem	Paralelo	Paralelo	Em linha e paralelo	Distribuída	Distribuída
Pontos de medidas em uma linha	1	1	10-50	10.000	30.000
Acurácia	Deformação ($\mu\epsilon$)	1	1		20
	Deslocamento (μm)	1	100	1	
	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)		0,1	0,1	0,2
	Inclinação (μrad)	30			
	Pressão (% final de escala)		0,25		
Escala	20 m			8 km	30 km
Tipo de fibra	Monomodo	Multimodo	Monomodo	Multimodo	Monomodo

2.4.5 O sistema DTSS – *Brillouin*

A mensuração do fenômeno de espalhamento de *Brillouin* pode ser obtida com o sistema DTSS da *Sensornet* (Figura 2.36), o qual foi utilizado nesta pesquisa. Este fenômeno foi descoberto pelo físico francês *Léon Brillouin* (1889-1969). O espalhamento de *Brillouin* é um tipo de reflexão que ocorre quando a luz percorre a fibra óptica. A fibra óptica não guia apenas ondas de luz, mas também ocorrem naturalmente ondas sonoras. As interações entre as ondas de luz e as ondas sonoras que viajam dentro da fibra provocam reflexões de *Brillouin*. Por este motivo os termos fibra “óptica” e fibra “ótica”, são similares e utilizados no meio tecnológico. Estas reflexões compreendem dois componentes, a luz de Stokes e a luz de anti-Stokes, sendo cada uma com frequências distintas. Os efeitos de espalhamento principais de luz são de *Rayleigh*, *Raman* e *Brillouin*. O espalhamento *Raman* ocorre devido a vibrações moleculares influenciadas termicamente, enquanto espalhamento de *Brillouin* ocorre devido à excitação térmica de ondas acústicas (Figura 2.37) (ITEN, 2011).



FIGURA 2.36. SISTEMA DTSS DA SENSORNET

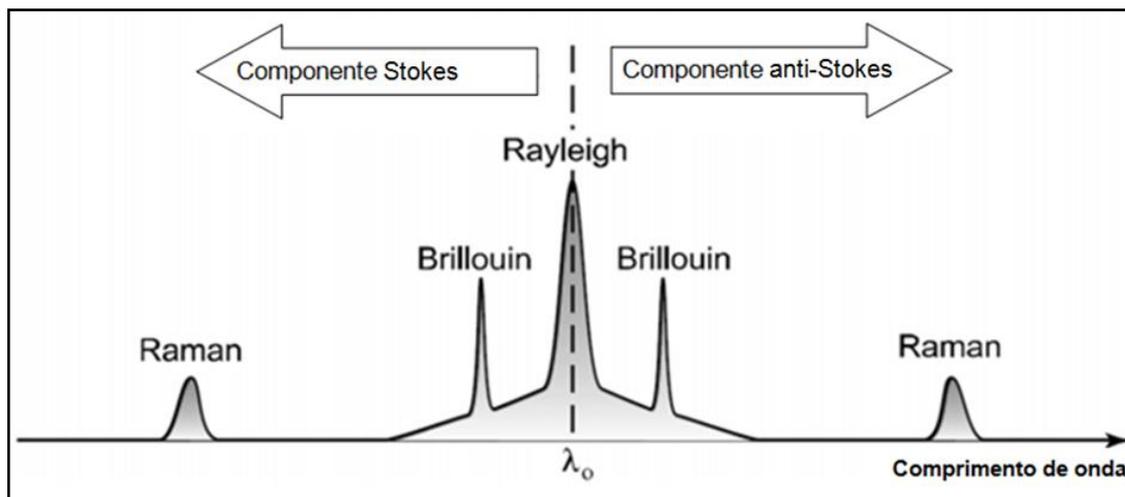


FIGURA 2.37. ESPECTRO DA LUZ ESPALHADA EM UMA FIBRA ÓPTICA

Reflexões de *Brillouin* são sensíveis a alterações na fibra resultante de efeitos externos, tais como temperatura e deformação. A Figura 2.38 mostra um exemplo onde a variação de temperatura e deformação causa alterações na frequência e na amplitude de *Brillouin* (KLUTH *et al.*, 2012).

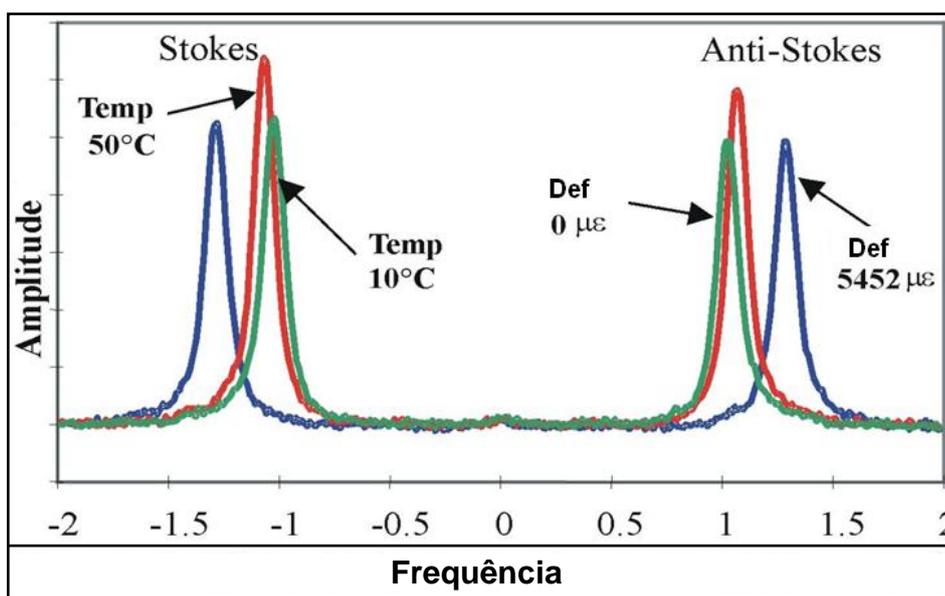


FIGURA 2.38. VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE BRILLOUIN COM TEMPERATURA E DEFORMAÇÃO (ADAPTADO DE KLUTH, 2012)

As posições dos picos de *Brillouin* dependem da temperatura e da deformação. Assim, a posição é deslocada se houverem mudanças de temperatura e/ou deformação. Isto é chamado de desvio de frequência de Brillouin e pode ser obtido através da Equação 2.3. O desvio de frequência de Brillouin, ν_B , é função do

índice de refração da fibra, n , da velocidade da onda acústica, v_A , na fibra (≈ 5800 m/s), e do comprimento de onda inicial da luz, λ_0 , (ITEN 2011, *apud* Horiguichi *et al.*, 1989).

$$v_B = \frac{2 \cdot n \cdot v_A}{\lambda_0} \quad (\text{Equação 2.2})$$

As posições dos picos *Raman* são fixas, mas a intensidade do componente anti-Stokes é dependente da temperatura, enquanto a intensidade do componente de Stokes não é afetada por mudanças de temperatura. Por consequência, através da comparação dos dois picos de *Raman*, a informação da temperatura no local de dispersão pode ser calculada.

2.4.6 Monitoramento geotécnico com a utilização da tecnologia de fibra óptica pelo método distribuído

Nos últimos anos, o sistema DTSS tornou-se uma tecnologia amplamente utilizada. Por outro lado, as aplicações geotécnicas desta tecnologia ainda são raras. Como a fibra óptica é um objeto frágil e os instrumentos geotécnicos muitas vezes exigem robustez, a fibra óptica e o solo resultam em uma combinação difícil. Além disso, devido às incertezas elevadas no comportamento do solo, um entendimento mais profundo dos princípios geomecânicos faz-se necessário a fim de alcançar resultados significativos quando se utiliza esta tecnologia.

Hoepffner *et al.* (2008) apresentam uma combinação da tecnologia de fibra óptica, pelo método distribuído de temperatura e deformação, para detectar movimentos de massa superficiais e zonas de esforços cisalhantes instalados em tubos de inclinômetros.

Para a avaliação dos movimentos de superfície, os cabos de fibra óptica são instalados em trincheiras escavadas, com profundidade de aproximadamente 15 cm e sempre que possível, em declive. A fim de garantir uma boa transmissão de movimentos ao cabo, âncoras especiais de 50 cm de comprimento devem ser instaladas ao longo da fibra (Figura 2.39).

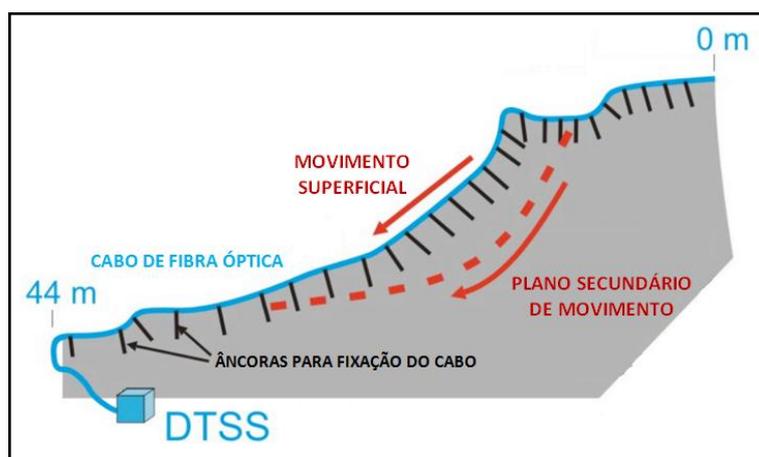


FIGURA 2.39. CONFIGURAÇÃO DA FIBRA PARA DETECAÇÃO DE MOVIMENTOS DE SUPERFÍCIE (HOEPFFNER ET AL., 2008).

Hoepffener *et al.* (2008) instalaram cabos de fibra óptica no exterior de tubos de inclinômetro visando à detecção dos movimentos de subsuperfície. A Figura 2.40 ilustra o comportamento do sinal do sistema DTSS quando há movimento de massa concentrada em uma determinada profundidade com zona de cisalhamento.

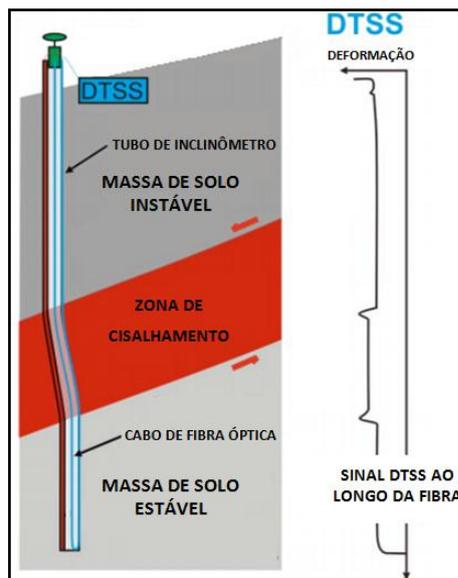


FIGURA 2.40. CONFIGURAÇÃO DA FIBRA PARA DETECÇÃO DE MOVIMENTOS DE SUBSUPERFÍCIES (HOEPFFNER ET AL., 2008)

Purzin *et al.* (2010) desenvolveu um sistema de micro-âncoras para serem incorporadas ao cabo de fibra óptica. O princípio deste sistema é que um cabo de fibra óptica fixado a micro-âncoras enterradas no solo acompanhe os mesmos movimentos da massa de solo em torno dele. A micro-âncora, ilustrada na Figura 2.41, é constituída por três planos perpendiculares entre si, formando um sistema tridimensional de movimento. O autor não descreve detalhes desta peça, como dimensões e material que a constitui.

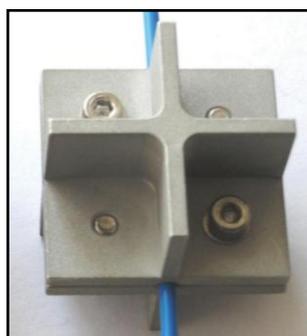


FIGURA 2.41. MICRO-ÂNCORA (PURZIN ET AL. 2010)

Testes de laboratório, realizados em uma caixa metálica de 9 m de comprimento que simulavam os movimentos apresentados na Figura 2.42, comprovaram a eficiência da utilização do sistema de ancoragem. O gráfico

apresentado na Figura 2.43 mostra a deformação imposta no sistema e a sensibilidade da detecção do movimento com e sem utilização de micro-âncoras no cabo de fibra óptica. O teste comprovou que o sistema de ancoragem é mais eficiente, comparando os dados obtidos e, a utilização das micro-âncoras tornou o sistemas significativamente mais sensível (PURZIN *et al.*, 2010).

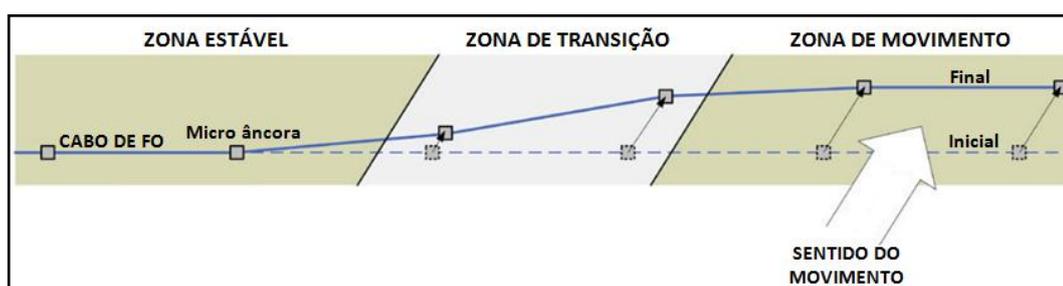


FIGURA 2.42. REPRESENTAÇÃO DO MOVIMENTO UTILIZADO NOS TESTE DE LABORATÓRIO (PURZIN *ET AL.* 2010)

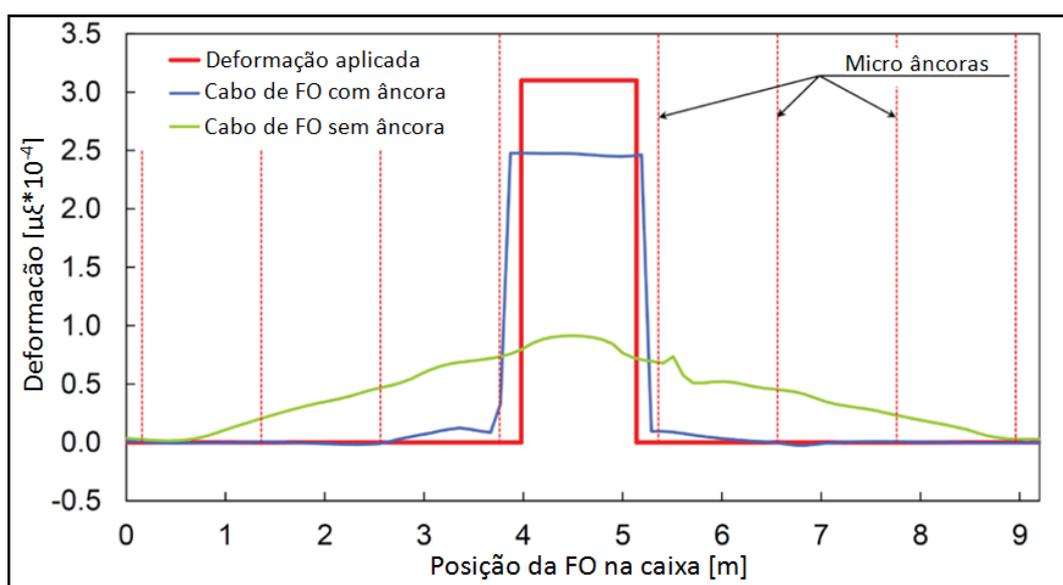


FIGURA 2.43. RESULTADOS GRÁFICOS DA EFICIÊNCIA (PURZIN *ET AL.* 2010)

Rocha (2011) desenvolveu um protótipo para monitorar a frente de umedecimento e analisou a variação do grau de saturação em solos arenosos com base em tecnologia de fibra óptica. A técnica utilizada baseou-se no método do aquecimento e na tecnologia do DFOT (*Distributed Fiber Optic Temperature Measurement*), que utiliza a componente espectral da luz de *Raman* para determinação da temperatura. O autor verificou ainda que a variação da densidade

do solo e o nível de água (NA) no terreno também podem ser determinados com base no método citado. A Figura 2.44 ilustra o comportamento da curva de aquecimento para determinação do nível d'água.

Quando a fibra está acima do NA (curva λ_1), o comportamento da curva de aquecimento é crescente; quando está abaixo do NA (curva λ_2) a curva tende a uma constante. Este comportamento deve-se ao fato da diferença entre a condutividade termina nos dois meios (ar e água).

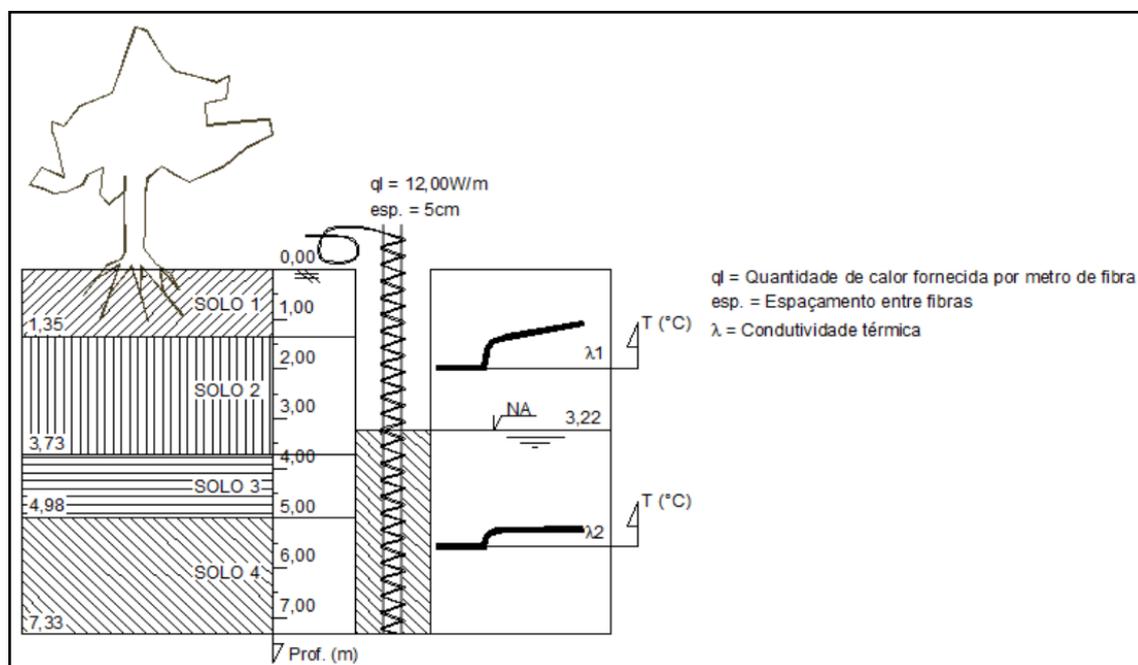


FIGURA 2.44. DETERMINAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA COM UTILIZAÇÃO DE FIBRA ÓPTICA (ROCHA, 2011)

Souza (2012) desenvolveu um sistema para obter o nível do lençol freático com base na tecnologia de fibra óptica através do método de aquecimento. A autora validou seu experimento através da comparação entre um sistema convencional, utilizando um medidor de nível de água consagrado na geotecnia, e um sistema desenvolvido com a tecnologia de fibra óptica. O medidor de nível de água com base na tecnologia de fibra óptica (MNA-FO) foi instalado no interior de tubos de PVC

ranhurados (medidor de nível de água convencional) a uma profundidade de aproximadamente 9,0 m no nível do terreno, como ilustra a Figura 2.45.

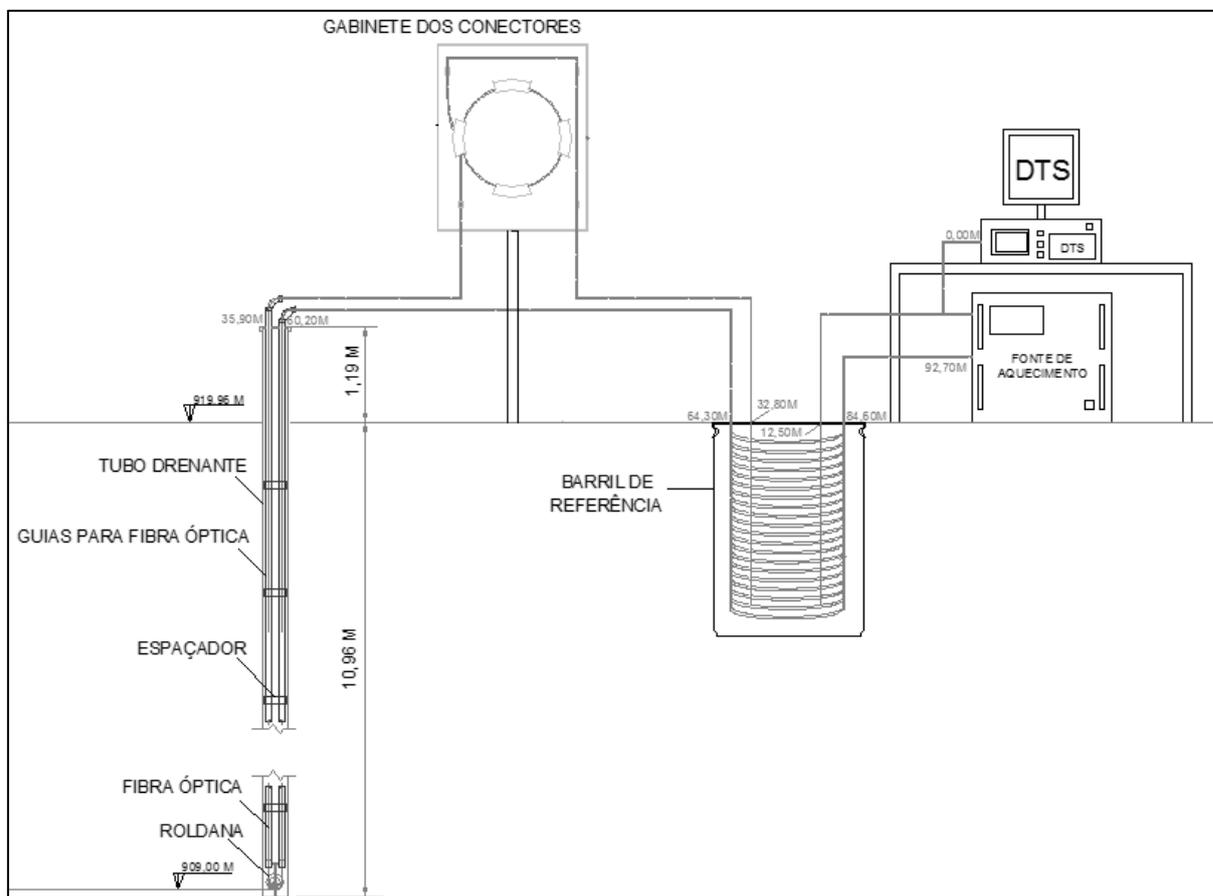


FIGURA 2.45. REPRENSETAÇÃO DO SISTEMA MNA-FO (SOUZA, 2012)

O sistema com a tecnologia de fibra óptica desenvolvida pela autora mostrou-se eficiente quando comparado com o método convencional, a Tabela 2.3 mostra os resultados obtidos com o sistema convencional e com o sistema desenvolvido na pesquisa.

TABELA 2.3. COMPARAÇÃO ENTRE MEDIDAS DE NÍVEL DE ÁGUA NO TERRENO

Verificação	Cota do nível de água (m)		Diferença entre medidas (m)
	Método convencional	Método da fibra óptica	
Agosto 2012	917,66	917,35	-0,31
Setembro 2012	917,55	917,22	-0,33
Outubro 2012	917,25	917,31	+0,06

A autora ainda afirma que as diferenças entre as medidas obtidas estão dentro da tolerância de 50 cm para aplicação do instrumento em barragens com alturas maiores de 15 m.

2.4.7 Vantagens e limitações da tecnologia de fibra óptica

Vários autores descrevem vantagens e limitações dos sensores de fibra óptica quando comparado com outros tipos de sensores convencionais.

Como vantagens podem ser citadas:

- A possibilidade de transmitir grandes quantidades de informações ao longo de um único cabo de fibra óptica (até 10 de km de comprimento, com sistema DTSS);
- Automatização e rápida aquisição de dados, substituindo as leituras manuais e julgamento do operador, monitoramento contínuo e sensoriamento remoto;
- Pequenos diâmetros que possibilitam a aplicação em espaços reduzidos;
- Leves, por consequência são fáceis de serem manuseadas;
- Imunidade a interferências eletromagnéticas (corrente elétrica, raios, etc). Além disso, não há eletricidade percorrendo o cabo de fibra óptica, portanto não há faísca para provocar explosão; e
- Custos reduzidos dos cabos de fibra óptica.

Embora existam muitas vantagens em utilizar sensores distribuídos de fibra óptica, há também desafios e limitações que devem ser compreendidos para que não ocorram falhas no monitoramento, entre estes:

- Dificuldades de instalação do sensor (fixação e incorporação na estrutura ou no solo);
- Perda óptica (o raio de curvatura mínimo não ser inferior a 10 vezes o diâmetro do cabo; há uma tensão limite máxima sobre a fibra, que depende do fabricante, que não deve ser excedida (esmagar o cabo);
- Ruptura da fibra (roedores; pontos de entrada e saída dos cabos na estrutura; fase de instalação).

Outro fator relevante que deve ser observado neste mesmo contexto, de vantagens e desvantagens quanto à utilização da tecnologia de sensores distribuídos de fibra óptica, são os custos envolvidos nos componentes, na instalação e nas campanhas de monitoramento. Bennett (2008) fez uma comparação de desempenho e custos envolvidos entre sensores distribuídos de fibra óptica com medida de deformação DTSS (mesma tecnologia utilizada nesta pesquisa), redes de *Bragg* e sensores convencionais de corda vibrante. As redes de *Bragg* são sensores pontuais de fibra óptica, entretanto não é permitido a instalação de mais de um sensor por cabo, ao contrário dos sensores convencionais. A Tabela 2.4 a seguir mostra a comparação entre estas três tecnologias.

TABELA 2.4. COMPARAÇÃO ENTRE TECNOLOGIAS PARA MEDIDAS DE DEFORMAÇÃO (BENNETT, 2008)

MÉTODO	CONVENCIONAL	REDES DE BRAGG	DTSS
Sensor	Corda vibrante	Fibra de redes de Bragg	Fibra óptica
Medição	Pontual	Pontual	Distribuída
Resolução da deformação	0,5 – 1 $\mu\epsilon$	0,1 – 10 $\mu\epsilon$	2 – 30 $\mu\epsilon$
Resolução espacial	50 – 250 mm	~ 2 – 40 mm	~ 1 m
Nº de sensores por cabo	1 por cabo	40 sensores	20.000 – 100.000 sensores
Tempo de aquisição	Ciclos de 600 Hz – 3 kHz	Acima de 5 MHz	4 – 25 minutos
Deformação máxima	3.000 $\mu\epsilon$	~ 10.000 $\mu\epsilon$	~ 10.000 $\mu\epsilon$
Custo do equipamento de leitura	\$2.000 – \$20.000	\$20.000 – \$100.000	\$100.000 - \$200.000
Custo do sensor	\$150 - \$500	\$50 - \$500	\$0,20 - \$20 por metro
Característica	Técnica convencional	Deformação com alta precisão	Medidas distribuídas

Quando é exigido um grande número de medições em um monitoramento, o custo dos sensores pontuais pode ser elevado. Em contrapartida o custo dos sensores distribuídos de fibra óptica torna-se uma técnica atraente para monitoramento em grande escala, neste caso o custo pode ser muito baixo. O custo da unidade leitora dos sensores distribuídos e das redes de Bragg é maior, mas a unidade pode ser movida entre as leituras para distribuir o custo (a unidade leitora não exige recalibração) (BENNETT, 2008).

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Este capítulo destina-se à apresentação dos materiais, equipamentos e procedimentos de ensaios de laboratório, realizados no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), para detectar e monitorar os movimentos relativos na transição entre zonas estáveis e zonas de movimento de massa em um meio contínuo de solo com o método distribuído de temperatura e deformação (DTSS). A Figura 3.1 ilustra o modelo conceitual para simulação e interpretação do movimento a partir de dados de deformações/tensões na fibra óptica (FO).

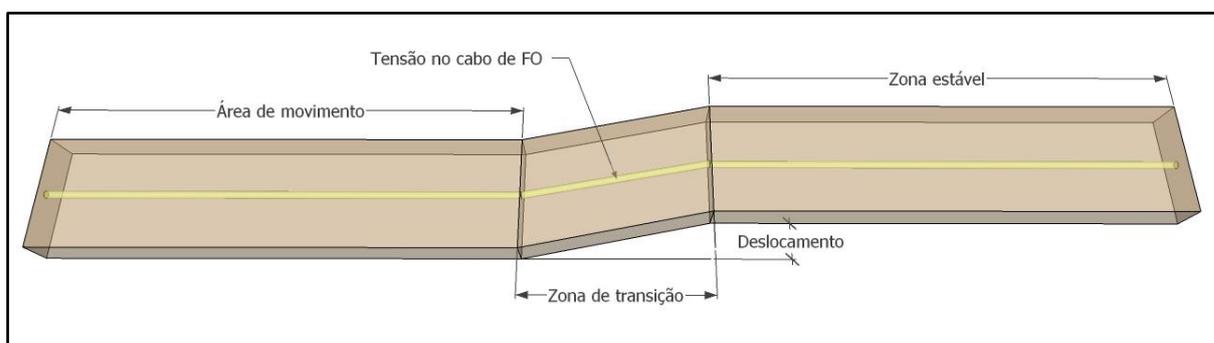


FIGURA 3.1. MODELO CONCEITUAL PARA SIMULAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE MOVIMENTO

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

O modelo para simulação em escala real da zona de cisalhamento é constituído por: um perfil metálico em formato de “U”; uma caixa metálica bipartida construída especificamente para os ensaios; cabos de fibra óptica; ancoragens especiais desenvolvidas para os cabos de fibra óptica; areia com granulometria uniforme; e unidade leitora DTSS da *Sensornet*. Os detalhes dos materiais e equipamentos citados estão descritos nos itens a seguir.

3.1.1 Perfil metálico em formato de “U”

Foi desenvolvido um sistema de tracionamento de cabo de fibra óptica para avaliar o desempenho do sistema de ancoragem da fibra óptica quando a mesma está sendo tracionada. Este sistema consiste em um perfil metálico com formato de “U”, com seção transversal de dimensões 15x20 cm, apresentadas na Figura 3.2, e que consiste em dois dispositivos. O primeiro dispositivo (denominado Ponto fixo 1), apresentado na Figura 3.3, é composto por uma estrutura de fixação do cabo de fibra óptica, guias lineares, parafuso de curso sem fim e uma manivela de tração. O segundo dispositivo (denominado Ponto fixo 2), apresentado na Figura 3.4, é composto apenas por uma estrutura de fixação do cabo de fibra óptica, que nos testes não foram utilizados para tal princípio. Esta estrutura foi substituída por âncoras que serão apresentadas no item 3.1.4. Em ambos os dispositivos o cabo de fibra óptica foi posicionado a uma distância de 5 cm da base e 10 cm do topo do perfil metálico.

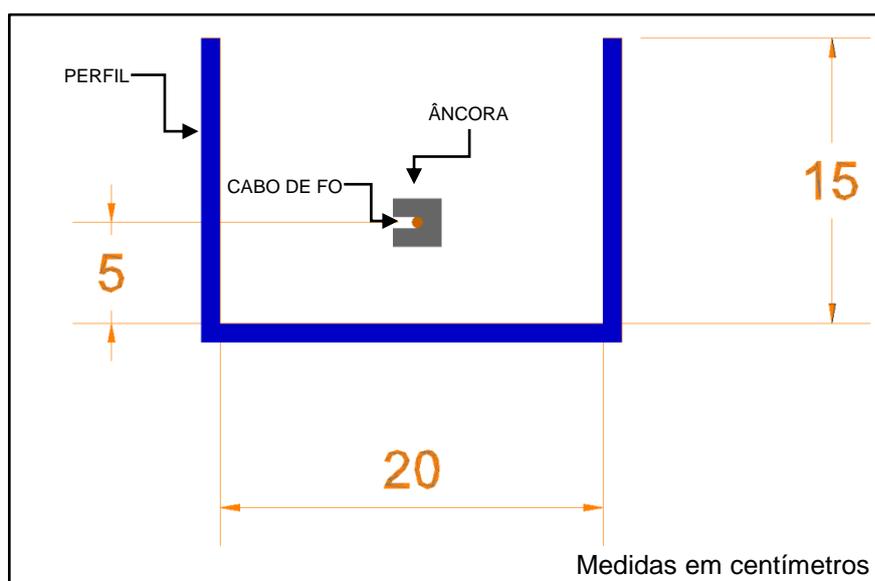


FIGURA 3.2. SEÇÃO TRANSVERSAL DO PERFIL METÁLICO

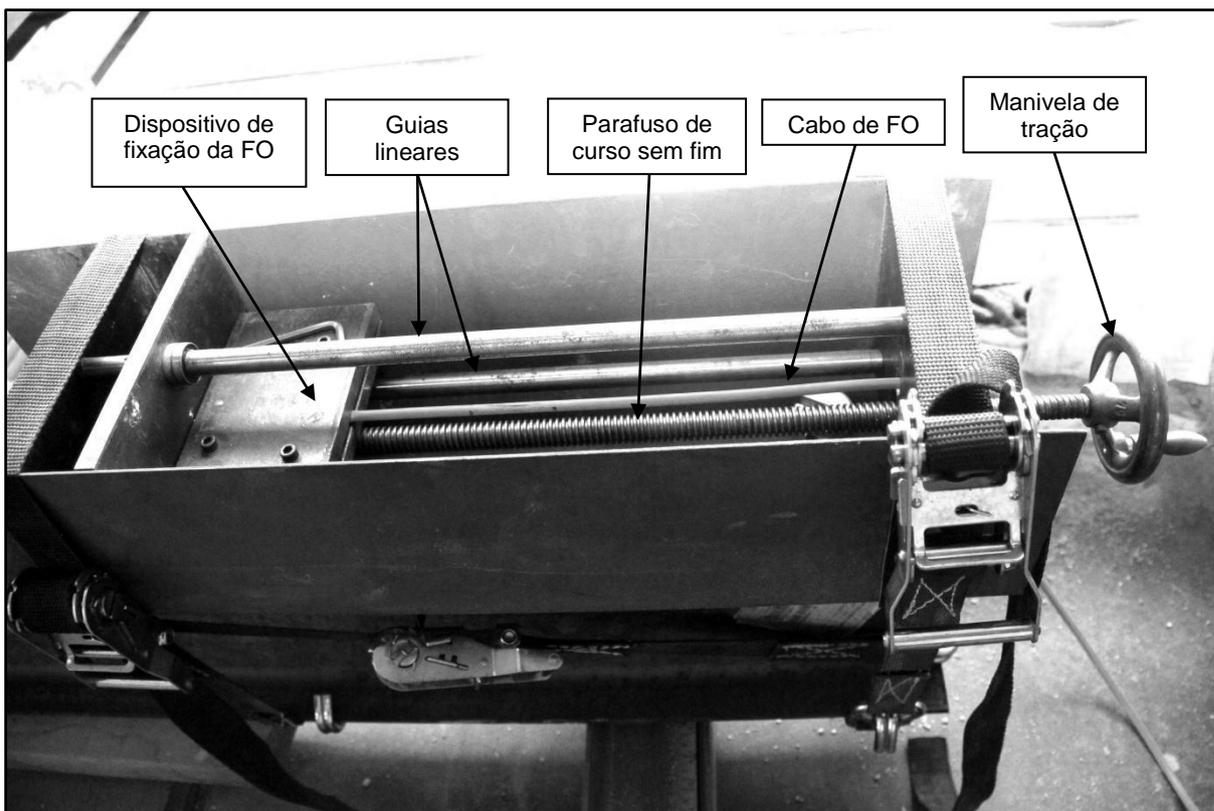


FIGURA 3.3. SISTEMA DE TRACIONAMENTO DO CABO DE FIBRA ÓPTICA (PONTO FIXO 1)

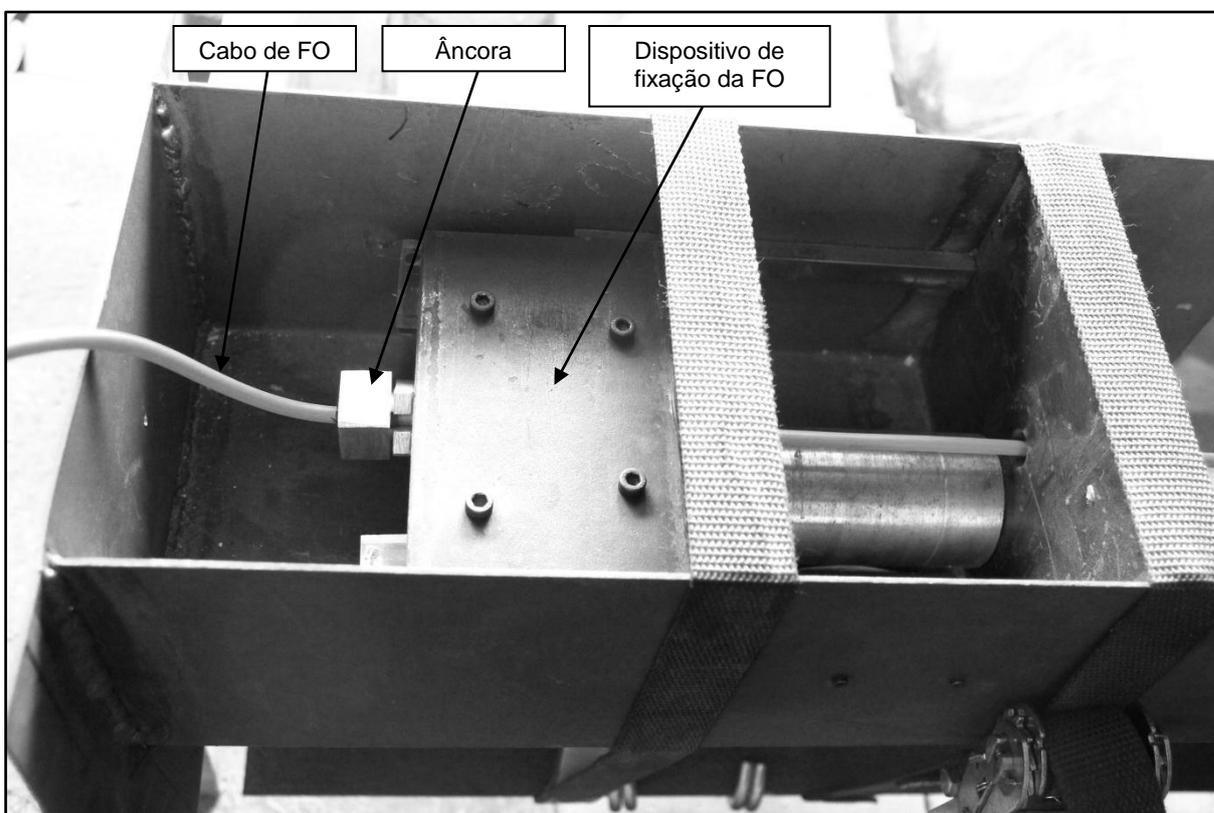


FIGURA 3.4. SISTEMA DE ANCORAGEM DO CABO DE FIBRA ÓPTICA (PONTO FIXO 2)

O perfil metálico em formato de “U” apresentado foi utilizado para avaliar o desempenho do sistema de ancoragem da fibra óptica quando a mesma está sendo tracionada.

3.1.2 Caixa de cisalhamento

A estrutura para simulação de zonas de cisalhamento consiste em um perfil metálico em formato de “U”, com seção transversal idêntica ao apresentado na Figura 3.2 e é dividida em três partes. A primeira parte, de comprimento de 2,20 m, é fixa. A segunda parte, de comprimento de 2,80 m, é montada sobre trilhos e rodas que permite o seu movimento no sentido transversal. A terceira parte, de comprimento de 1,10 m, faz a união entre as duas primeiras partes, tendo uma das extremidades fixa e outra móvel, montada sobre rodas que permite movimentos angulares, denominada de zona de cisalhamento. A Figura 3.5 traz uma ilustração deste equipamento.

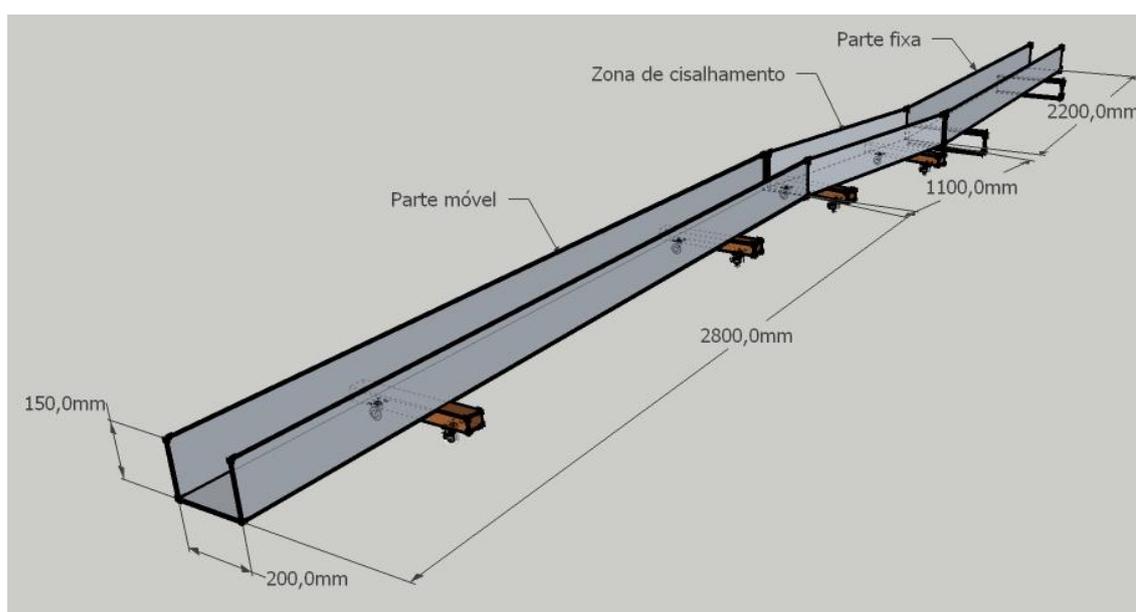


FIGURA 3.5. VISÃO TRIDIMENSIONAL DA CAIXA DE CISALHAMENTO

O mecanismo de movimento da estrutura é realizado por uma prensa de compressão axial que foi adaptada para o experimento e instalada na parte móvel da caixa (Figura 3.6). Desta forma, a velocidade de deslocamento da parte móvel podia ser controlada e ajustada através da rotação de uma manivela da prensa. Comparando a Figura 3.7 com a Figura 3.8, pode-se ter uma ideia do funcionamento da caixa de cisalhamento onde a parte móvel pode se movimentar transversalmente em uma distância de até 20 cm da sua posição inicial.

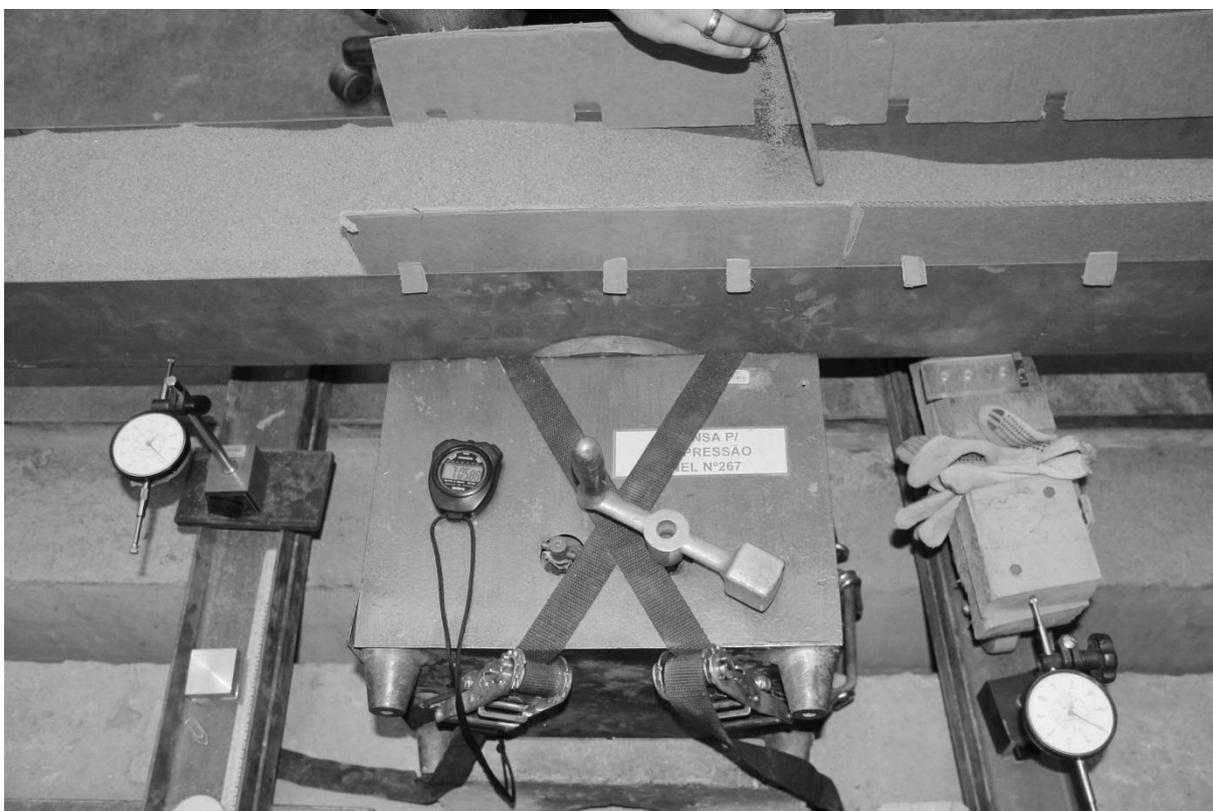


FIGURA 3.6. PRENSA DE COMPRESSÃO AXIAL ADAPTADA PARA O ENSAIO

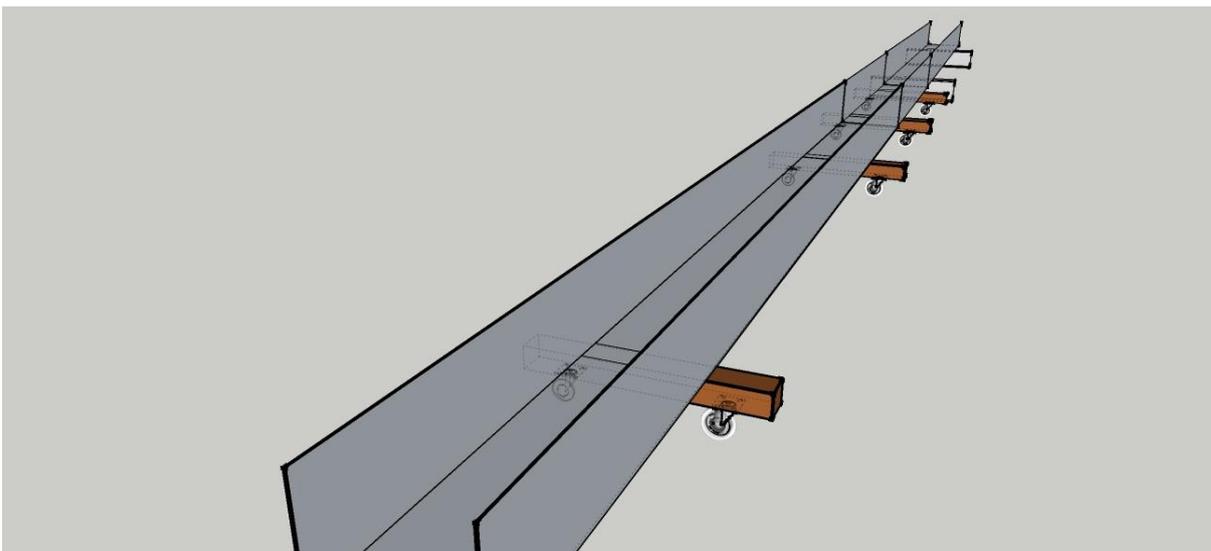


FIGURA 3.7. CAIXA DE CISALHAMENTO – POSIÇÃO INICIAL DO ENSAIO

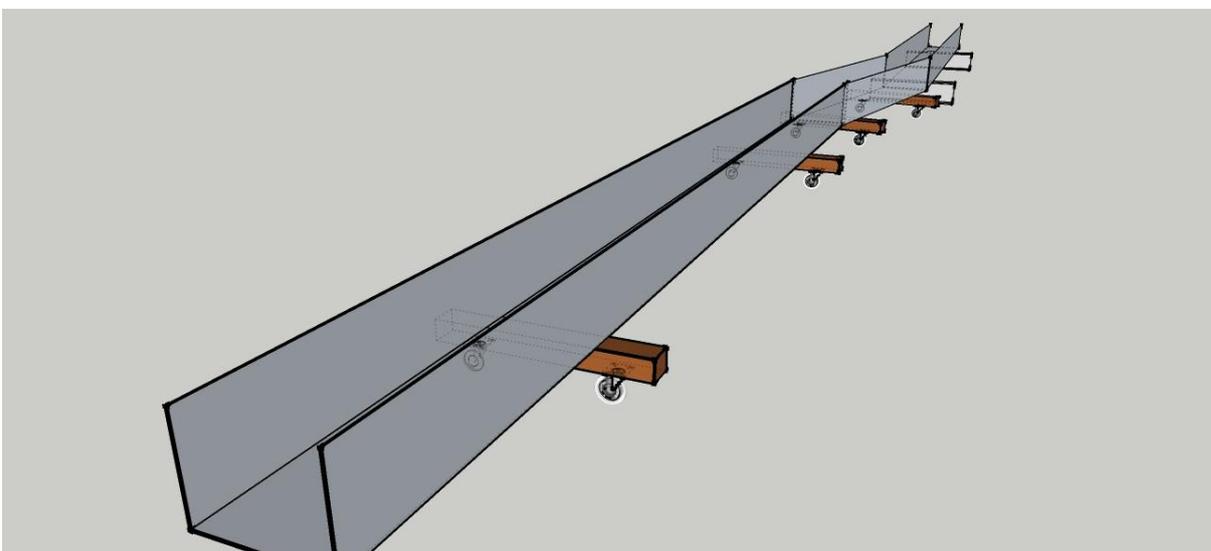


FIGURA 3.8. CAIXA DE CISALHAMENTO – POSIÇÃO FINAL DO ENSAIO

A Figura 3.9 a seguir ilustra a caixa de cisalhamento e seus componentes (prensa de compressão axial, cronômetro e relógios comparadores que foram utilizados para controle do deslocamento da parte móvel).

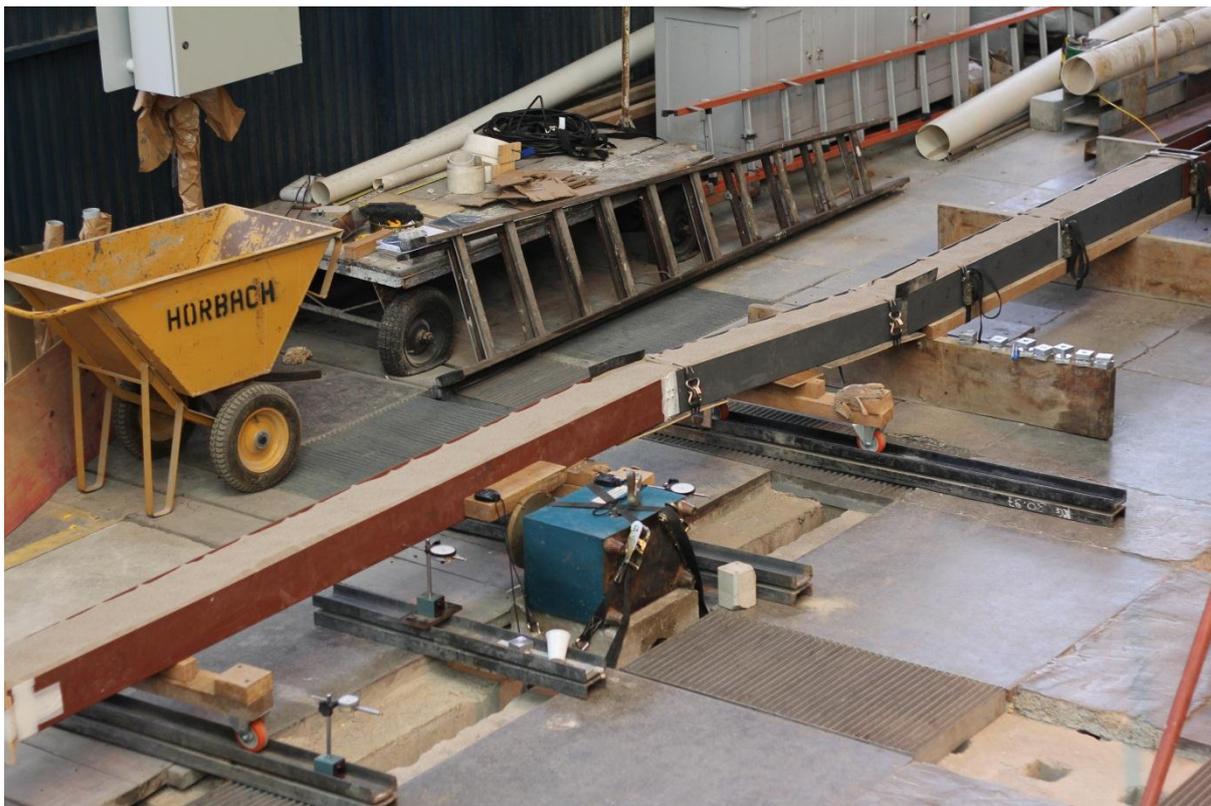


FIGURA 3.9. CAIXA DE CISALHAMENTO

3.1.3 Cabo de fibra óptica

Para o monitoramento geotécnico utiliza-se o cabo de fibra óptica como sensor. Este cabo é comercializado por diversas empresas. Entretanto, decidiu-se utilizar nesta pesquisa o cabo de fibra óptica comercializado pela *Sensornet*. O cabo de fibra óptica possui 5 mm de diâmetro e é composto por 4 fibras ópticas, sendo 2 do tipo multimodo (DTS – cores verde e marrom) e 2 do tipo monomodo (DTSS – cores azul e laranja). O mesmo possui elementos de reforço à tração como fibras de *Kevlar* envoltas por uma camada de proteção externa, como pode ser visto na Figura 3.10. A resistência máxima à tração deste cabo de fibra óptica, informada pelo contratante, é de 3 kN e deformação máxima de 20.000 $\mu\epsilon$ (equivalente a 2%).

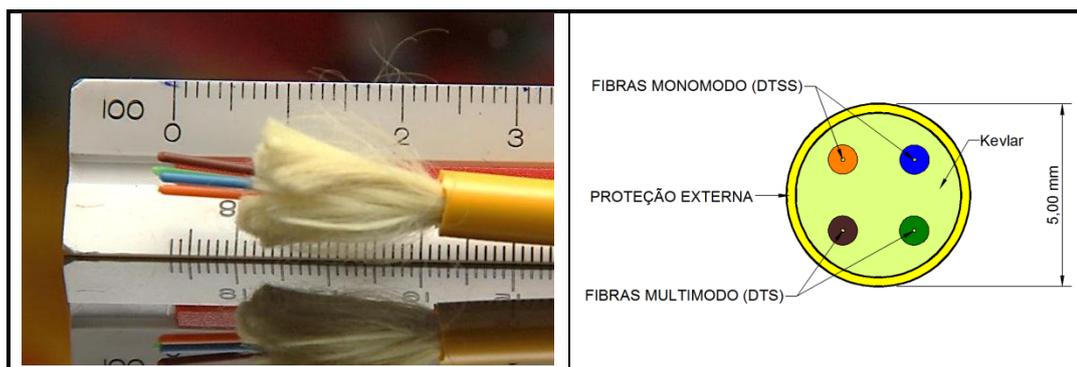


FIGURA 3.10. CABO DE FIBRA ÓPTICA

3.1.4 Âncora

Com objetivo de detectar movimentos de massa, parte-se do princípio que um cabo sensor de fibra óptica instalado subsuperficialmente na face de uma encosta ou de uma barragem de terra, deve sofrer os mesmos movimentos que o solo. Neste contexto, foram idealizados sistemas de ancoragens, chamados de Elementos de Ancoragem de Cabos de Fibra Óptica (EDAF).

Os EDAF se referem a peças de alumínio de formato cúbico que se prendem ao cabo de fibra óptica através de um sistema de prensa-cabos, construído em *Nylon*. O formato do prensa cabo em *Nylon* foi estudado até se obter a melhor interação cabo-âncora, de maneira que o EDAF ao se prender ao cabo de fibra óptica, não fosse deslocado no tracionamento do cabo. O sistema foi estudado visando à facilidade de instalação deste elemento em campo de tal forma que a sua instalação possa ocorrer em qualquer posição do cabo e sem a utilização de qualquer tipo de ferramenta ou execução de corte da fibra e posterior fusão. A Figura 3.11 apresenta uma ilustração deste sistema e a Figura 3.12 mostra uma fotografia do conjunto EDAF e prensa-cabos.

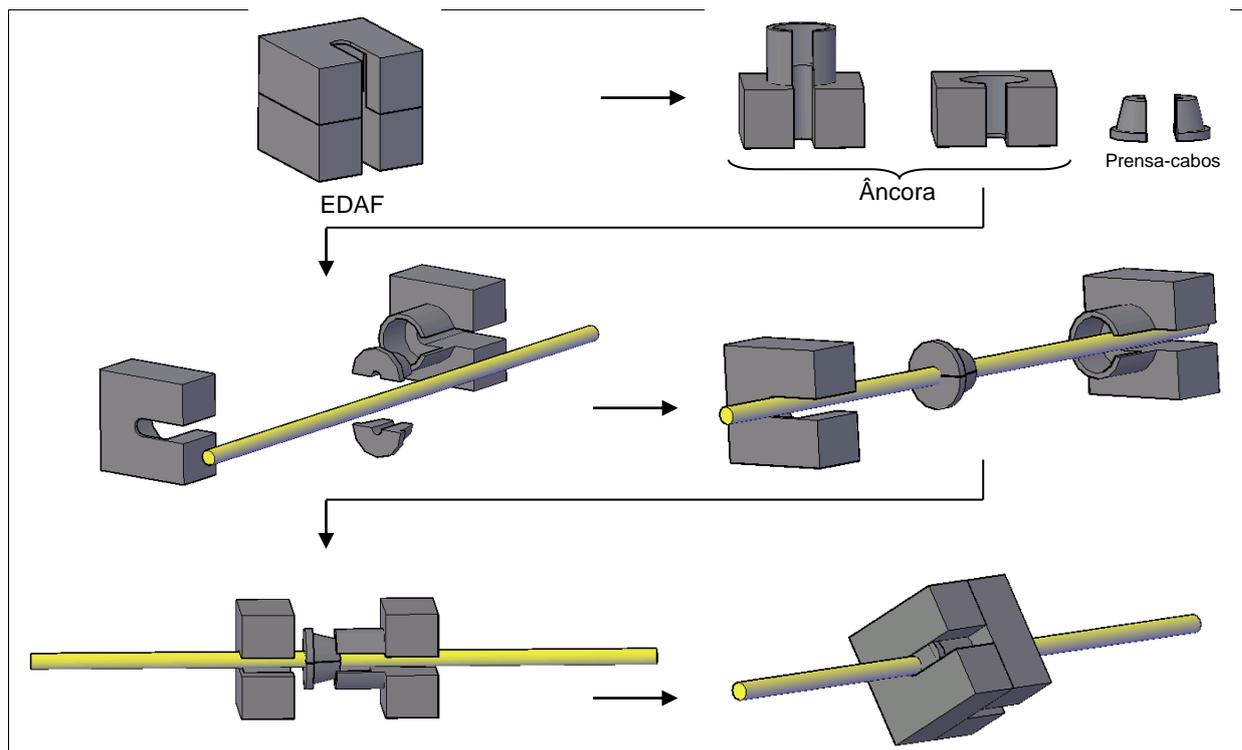


FIGURA 3.11. SISTEMA DE ANCORAGEM DO CABO DE FIBRA ÓPTICA

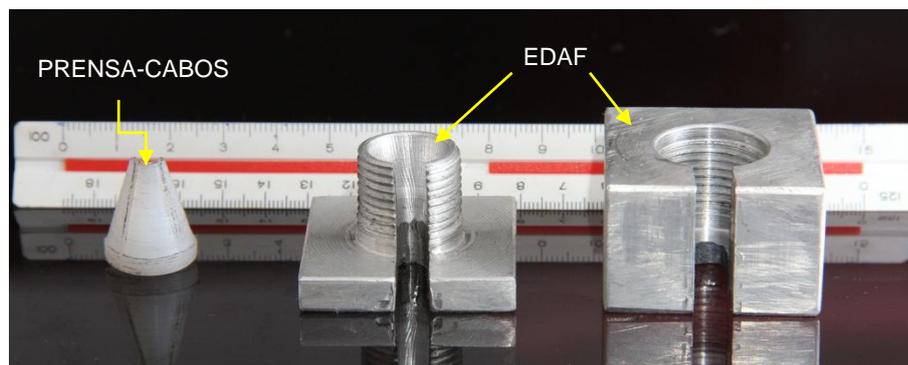


FIGURA 3.12. CONJUNTO EDAF E PRENSA-CABOS

Foram utilizados nos testes três tamanhos de EDAF, sendo um com arestas de 25 mm, um com 36 mm e outro com 50 mm (Figura 3.13). A Figura 3.14 apresenta os dois formatos de prensa-cabos projetados, denominados de “*Tipo 1*” e “*Tipo 2*”.

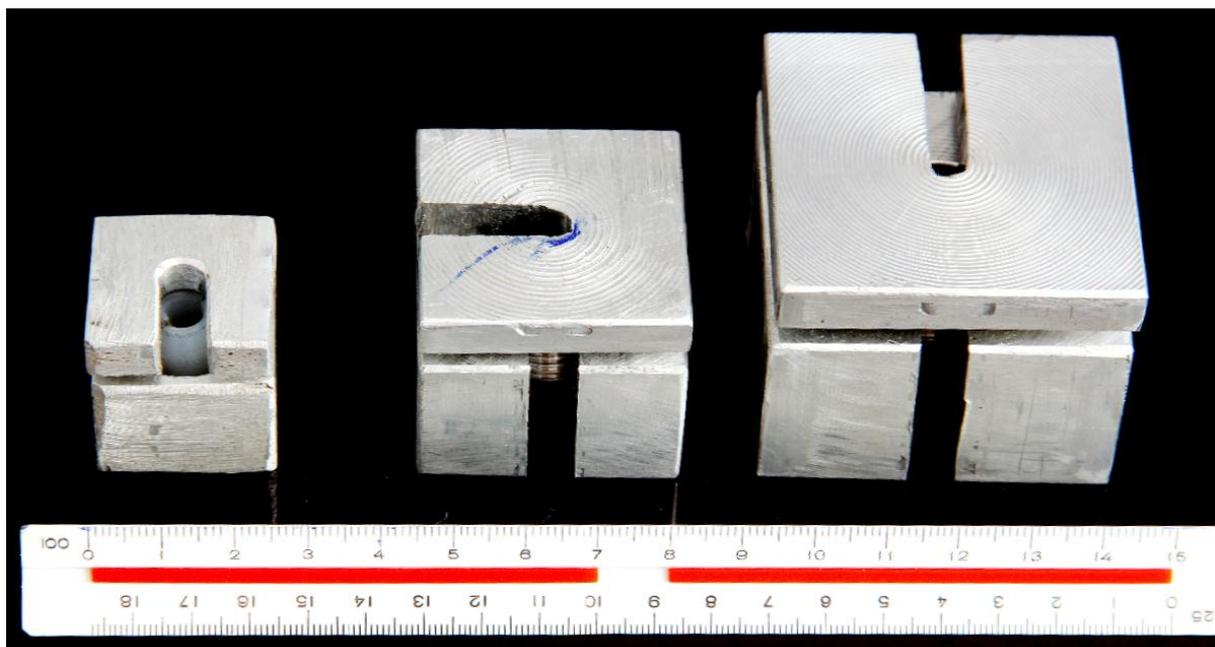


FIGURA 3.13. ELEMENTOS DE ANCORAGEM DE FIBRA ÓPTICA

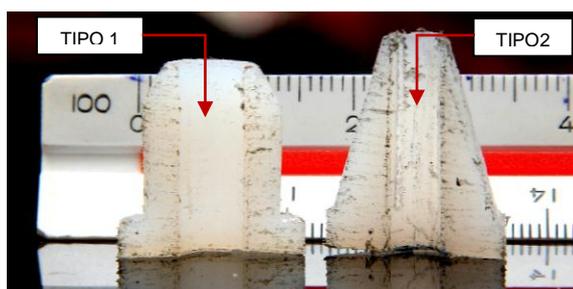


FIGURA 3.14. PRENSA-CABOS EM NYLON DOS EDAF

Visando o aperfeiçoamento deste sistema, um novo modelo de EDAF foi desenvolvido a partir dos resultados obtidos nos dois modelos de prensa-cabos apresentados (*Tipo 1* e *Tipo 2*). Os procedimentos seguidos nos testes e os resultados obtidos nestes utilizando os EDAF desenvolvidos estão apresentados nos itens 3.2.3 e 4.3, respectivamente.

Conforme o que já foi citado, no novo modelo idealizado não foi projetado um sistema de prensa-cabos em *Nylon*. Este novo EDAF é composto por um conjunto de 3 peças, sendo um prisma com rosca macho, um prisma com rosca fêmea e uma arruela. A arruela tem um papel fundamental neste elemento, no momento em que as duas metades, macho e fêmea, estão sendo rosqueadas; a

arruela não permite que o cabo de fibra óptica seja torcido no momento de torque entre as peças.

A Figura 3.15 ilustra os procedimentos de instalação do EDAF no cabo de fibra óptica. A Figura 3.16 mostra uma fotografia deste elemento. O novo modelo desenvolvido tornou-se mais prático quanto à instalação ao cabo e reduziu significativamente os custos de produção destes elementos em série.

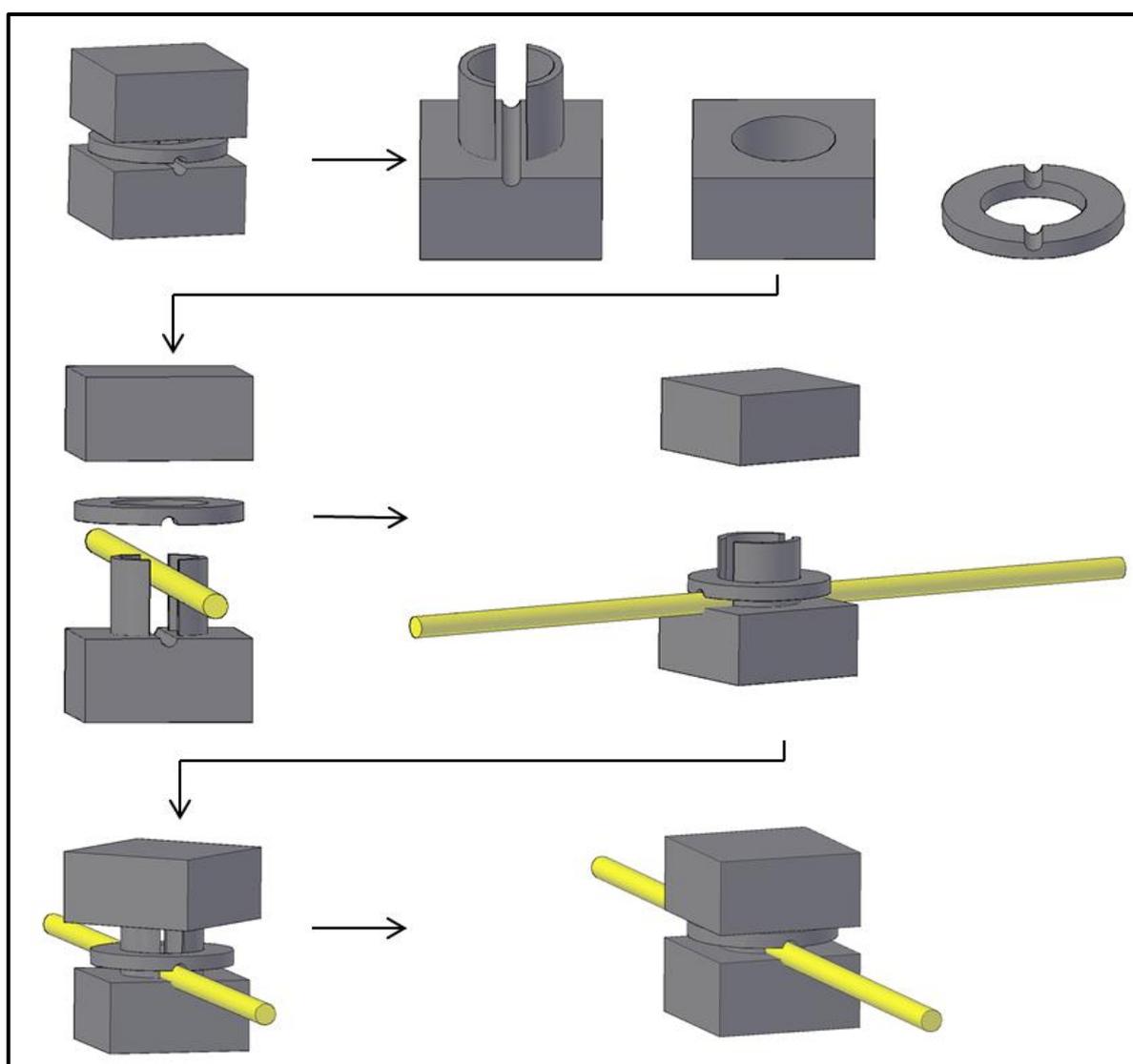


FIGURA 3.15. EDAF COM SISTEMA DE PRENSA-CABOS INTEGRADOS

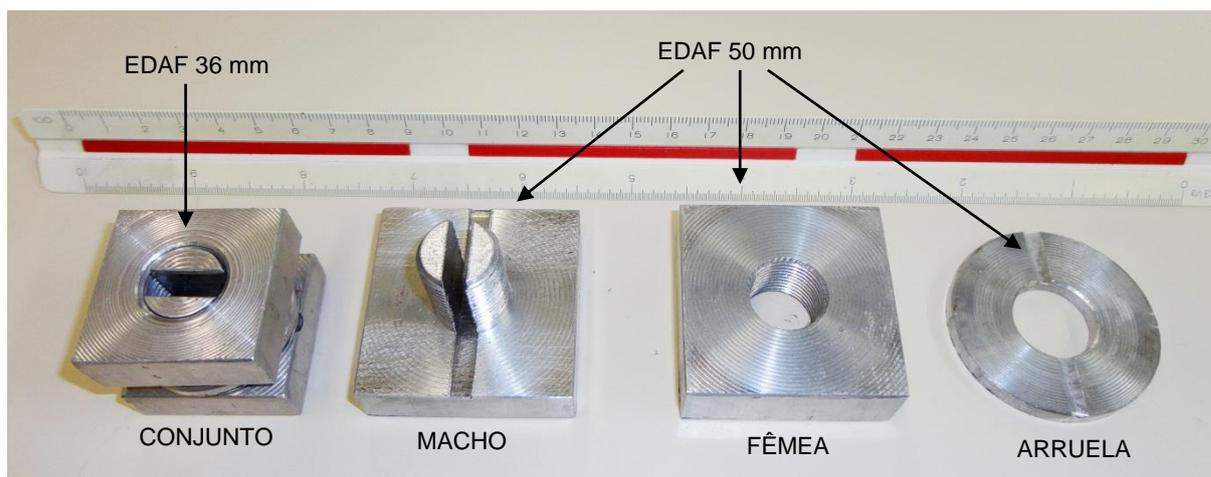


FIGURA 3.16. EDAF COM SISTEMA DE PRENSA-CABOS INTEGRADOS

Neste último modelo de EDAF pode ser observada ainda uma pequena evolução na geometria da peça, onde se idealizou a execução de uma “canaleta” com o diâmetro de 4 mm (1 mm inferior ao diâmetro do cabo de fibra óptica). Esta canaleta foi executada no EDAF visando a manutenção do cabo de fibra óptica na mesma posição após a aplicação de torque para o aperto das peças macho e fêmea.

3.1.5 Solo arenoso

O solo selecionado para os experimentos desenvolvidos refere-se a uma areia com distribuição granulométrica uniforme e diâmetro dos grãos compreendidos entre 0,50 mm e 0,90 mm. Após a aquisição da quantidade de areia necessária para utilização nos experimentos, a mesma foi caracterizada em laboratório. Os testes realizados com a fibra óptica foram realizados com a areia citada, na condição seca. Os procedimentos dos ensaios de caracterização geotécnica da areia (massa específica dos grãos, análise granulométrica e índice de vazios máximo e mínimo) estão descritos no item 3.2.1 e os resultados serão apresentados no item 4.1.

3.1.6 Unidade leitora DTSS

A unidade leitora DTSS (*Distributed Temperature and Strain Sensor*) é um sistema desenvolvido pela *Sensornet* (Figura 3.17), que mede o espectro de *Brillouin*, tanto na luz *anti-Stokes* quanto na luz *Stokes*, a cada 1,02 m ao longo da fibra óptica. A análise destes dados permite que a deformação e a temperatura possam ser medidas de forma independente e simultaneamente em todos os pontos da fibra, ao longo de até 10 km de comprimento.

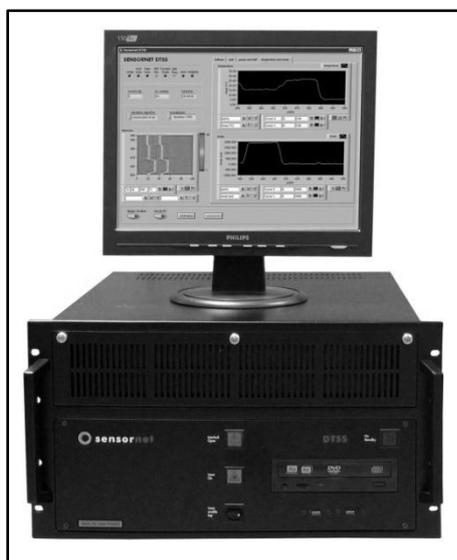


FIGURA 3.17. SISTEMA DTSS

A resolução do sistema DTSS, informada nos catálogos da *Sensornet*, é de 1°C para medidas de temperatura e 10 $\mu\epsilon$ para medidas de deformação. Esta resolução da deformação será verificada nos ensaios de tração do cabo de fibra óptica (item 3.2.3).

3.2 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

Neste item serão abordados os procedimentos detalhados dos ensaios e testes realizados nesta pesquisa.

3.2.1 Caracterização do solo arenoso

Os ensaios de caracterização geotécnica realizados (massa específica dos grãos, análise granulométrica, índice de vazios máximo e índice de vazios mínimo) seguiram as recomendações descritas nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

A partir da amostra seca ao ar até constância de massa em ambiente com temperatura e umidade controlada, conforme recomendações da norma ABNT NBR 6457:1986 e ABNT 6508:1984, foi determinado a massa específica dos grãos. Este ensaio é realizado em balões volumétricos (Figura 3.18) e consiste em procedimentos para se obter a relação entre massas e volumes do solo e de água destilada, sendo considerados satisfatórios os valores que não diferirem de $\pm 0,02$ g/cm³ da média entre pelo menos duas determinações.



FIGURA 3.18. ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

A curva de distribuição granulométrica do material foi determinada através do peneiramento simples, conforme recomendações da norma ABNT NBR 7181:1984. Para o peneiramento, o material foi primeiramente seco em estufa à

temperatura de 105 °C a 110°C, até a constância de massa. A partir de então o solo é transferido para um conjunto de peneiras de malha quadrada que tenham aberturas progressivamente menores (abertura da malha decrescente de cima para baixo) e as frações são separadas através de um agitador mecânico. As porcentagens são calculadas a partir da massa de solo total e da massa de solo retida em cada peneira.

O resultado do ensaio é expresso graficamente em escala semilogarítmica, com a porcentagem (em escala aritmética) no eixo da ordenada e o tamanho da abertura da peneira no eixo da abscissa (em escala logarítmica). A Figura 3.19 apresenta o ensaio sendo realizado.

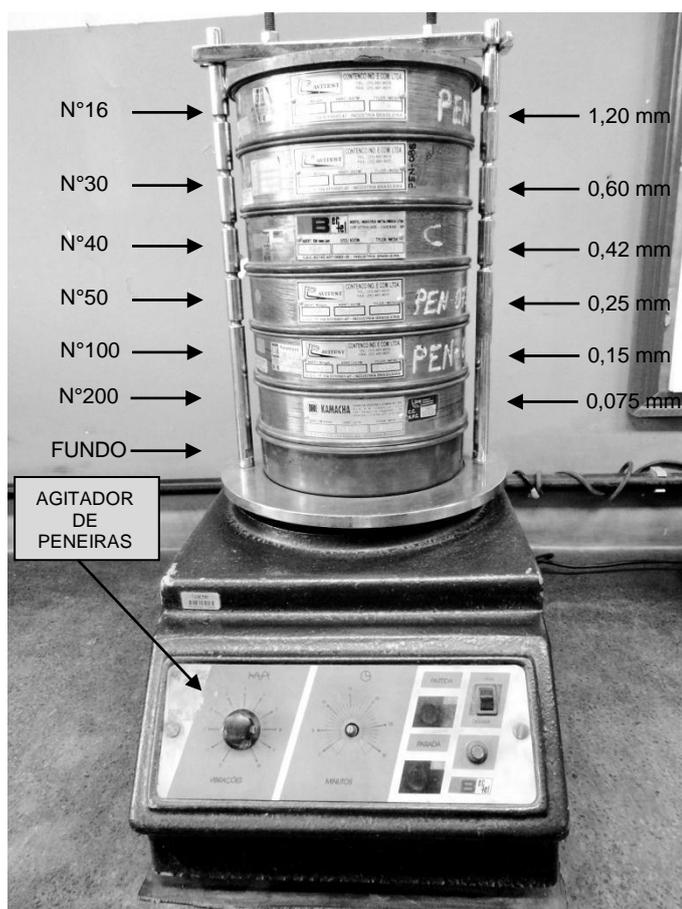


FIGURA 3.19. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A determinação do índice de vazios máximo ou massa específica seca mínima corresponde ao estado mais fofo em que um solo granular pode permanecer. O procedimento do ensaio envolve o uso de um molde cilíndrico com volume conhecido, onde o solo é colocado através de um funil, vertendo-o através do bico com altura de queda livre das partículas de areia em aproximadamente 1 cm. O índice de vazios máximo é determinado através da Equação 3.1. A norma ABNT NBR 12004:1990 prescreve os procedimentos detalhados para o ensaio.

$$e_{max} = \frac{\rho_s \times V_m}{M_{min}} - 1 \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

$e_{m\acute{a}x}$ – índice de vazios máximos;

ρ_s – massa específica dos grãos;

V_m – volume do molde; e

M_{min} – massa de solo fofo que preenche o volume V_m .

A determinação do índice de vazios mínimo ou massa específica seca máxima corresponde ao estado mais compacto em que um solo granular pode permanecer. Este parâmetro é determinado vibrando-se o solo em um molde cilíndrico de volume conhecido por 8 minutos a uma frequência de 60 Hz. Na parte superior do molde é adicionado sobre a areia uma sobre carga de 13,8 kPa. O índice de vazios mínimos é determinado através da (Equação 3.2). A norma ABNT NBR 12051:1991 prescreve os procedimentos detalhados para o ensaio.

$$e_{min} = \frac{\rho_s \times V_m}{M_{max}} - 1 \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

e_{min} – índice de vazios mínimos;

ρ_s – massa específica dos grãos;

V_m – volume do molde; e

M_{max} – massa de solo compacto que preenche o volume V_m .

3.2.2 Procedimentos prévios aos testes com fibra óptica

Para que o solo (areia seca) mantivesse as mesmas características nos diferentes testes conduzidos com a fibra óptica (itens 3.2.3, 3.2.4 e 3.2.5), o mesmo foi moldado através do método da chuva de areia, proposto por Presti *et al.* (1992). Este método consiste na simulação de uma chuva de areia seca e uniforme com vazão e altura de queda controlada e pré-estabelecida.

A calibração da chuva de areia foi realizada utilizando-se um funil, uma mangueira flexível de borracha, uma guia de referência para controle da altura de queda e um cilindro metálico de volume conhecido (Figura 3.20).

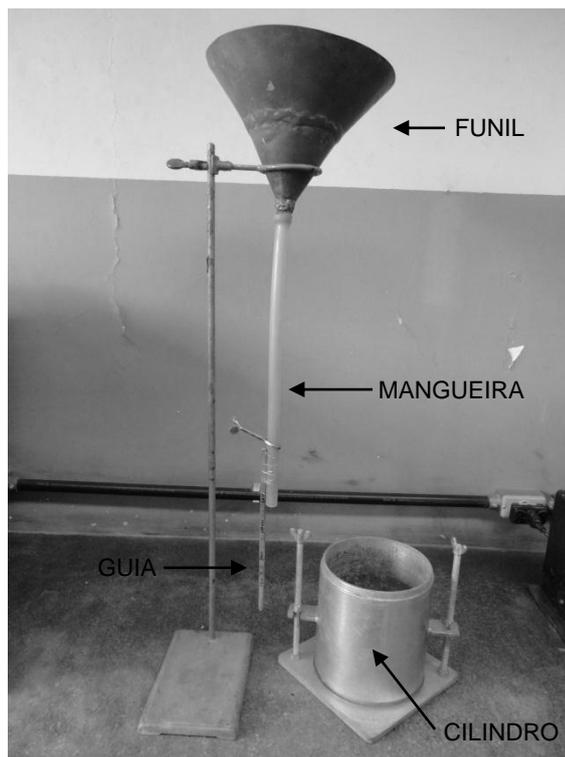


FIGURA 3.20. EQUIPAMENTOS PARA CALIBRAÇÃO DA CHUVA DE AREIA

A calibração consistiu na indução da chuva de areia no interior do cilindro em uma altura de queda constante até o preenchimento completo do cilindro pela areia. Com os dados da massa de solo preenchida e do volume do cilindro foi possível determinar o índice de vazios para determinadas alturas de queda. As alturas de queda foram estabelecidas em 5, 10, 15 e 20 cm. O índice de vazios foi determinado a partir da média entre três determinações para cada altura de queda. O resultado da calibração encontra-se apresentado no Capítulo 4, item 4.2.

3.2.3 Verificação dos elementos de ancoragem de fibra óptica

A verificação dos diferentes modelos de Elementos de Ancoragem de Fibra Óptica (EDAF) foi realizada no perfil metálico em formato de “U”, os quais foram descritos no item 3.1.1. Este teste teve o objetivo de verificar os níveis máximos de deformações da fibra óptica (FO) quando um EDAF se encontra instalado na mesma sem a verificação de deslocamento da EDAF na fibra óptica.

O teste foi configurado com o posicionamento do sistema de tracionamento (Ponto fixo 1) distante 5,6 m (distância do trecho ancorado entre pontos fixos) do sistema de ancoragem (Ponto fixo 2), conforme ilustrado na Figura 3.21. Desta forma, garantiu-se que pelo menos 5 pontos de leitura pudessem ser registrados durante os testes, já que a unidade leitora DTSS possui resolução espacial de 1,02 metros ao longo da fibra.



FIGURA 3.21. CONFIGURAÇÃO DOS TESTES DOS EDAF

Antes de iniciar os registros na unidade leitora, foi aplicada uma pré-tensão no cabo de fibra óptica que provocasse uma deformação de pelo menos $1500 \mu\text{e}$ no trecho ancorado. Este procedimento foi realizado para identificar a posição do cabo que será influenciada pelo ensaio e para tornar o sistema mais sensível no registro de pequenas deformações, caso contrário o cabo poderia ficar em repouso no solo e pequenas deformações não seriam registradas.

Os testes foram iniciados, configurando a unidade leitora para registrar os dados de deformação na fibra em um intervalo de tempo de 2 minutos. A deformação máxima estabelecida foi de 10.000 $\mu\epsilon$ que foi subdividida em 14 passos, sendo estas: 0%, 0,025%, 0,050%, 0,075%, 0,100%, 0,150%, 0,200%, 0,250%, 0,300%, 0,350%, 0,400%, 0,450%, 0,500% e 1,000%. Em cada passo de tracionamento era mantido o tempo de 8 minutos, garantido-se que a unidade leitora registrasse pelo menos 4 leituras por passo. Os passos eram incrementados no intervalo de tempo entre 8 e 10 minutos e estas leituras não eram consideradas na interpretação dos resultados. Os resultados e a discussão dos diferentes modelos dos EDAF são apresentados no item 4.

3.2.4 Teste de arrancamento

Os testes de arrancamento foram realizados no perfil metálico em formato de “U”, apresentado no item 3.1.1. Neste perfil, primeiramente foi preenchido uma camada de solo de 5 cm de espessura, através do método de chuva de areia descrito no item 3.2.2, para assentamento do cabo. A partir de então o cabo era protendido até uma deformação próxima de 1500 $\mu\epsilon$ para identificar a posição do cabo que seria influenciada pelo ensaio. A Figura 3.22 ilustrada o que foi exposto.



FIGURA 3.22. INSTALAÇÃO DO CABO DE FIBRA ÓPTICA NO TESTE DE ARRANCAMENTO

Para verificação do índice de vazios da areia utilizada nos ensaios, durante a preparação do teste, foram instalados cápsulas de volumes conhecidos em diferentes posições no perfil metálico. Após o preenchimento das cápsulas, estas foram cuidadosamente coletadas para pesagem. Desta forma foi possível o cálculo do índice de vazios no processo de instalação da fibra óptica, garantindo assim que em todos os experimentos o solo mantivesse sempre os mesmos índices físicos. Com esta garantia, os resultados de todos os testes realizados puderam ser comparados entre si. A Figura 3.23 ilustra uma etapa do processo de moldagem e preparação de um teste com o cabo de fibra óptica.



FIGURA 3.23. CHUVA DE AREIA E CONTROLE DO ÍNDICE DE VAZIOS

Nos testes de arrancamento, onde foram utilizados os EDAF, foram verificadas 4 configurações de instalação para interpretação dos resultados de tração no cabo de fibra óptica, simulando assim movimentos de massa no sentido longitudinal do cabo. Na primeira configuração, os EDAF são instalados em distâncias espaçadas em 50 cm no cabo de fibra óptica. Na segunda, o espaçamento entre EDAF foi estabelecido em 100 cm. Na terceira, a cada 200 cm e na quarta configuração não foram utilizados EDAF, ou seja, não foram instalados os elementos de ancoragem no cabo de fibra óptica. A Figura 3.24 apresenta uma ilustração da configuração dos testes de arrancamento com e sem a utilização dos EDAF.

Os procedimentos de configuração da unidade leitora e registro das informações durante os ensaios foram os mesmos descritos no item anterior (3.2.3).

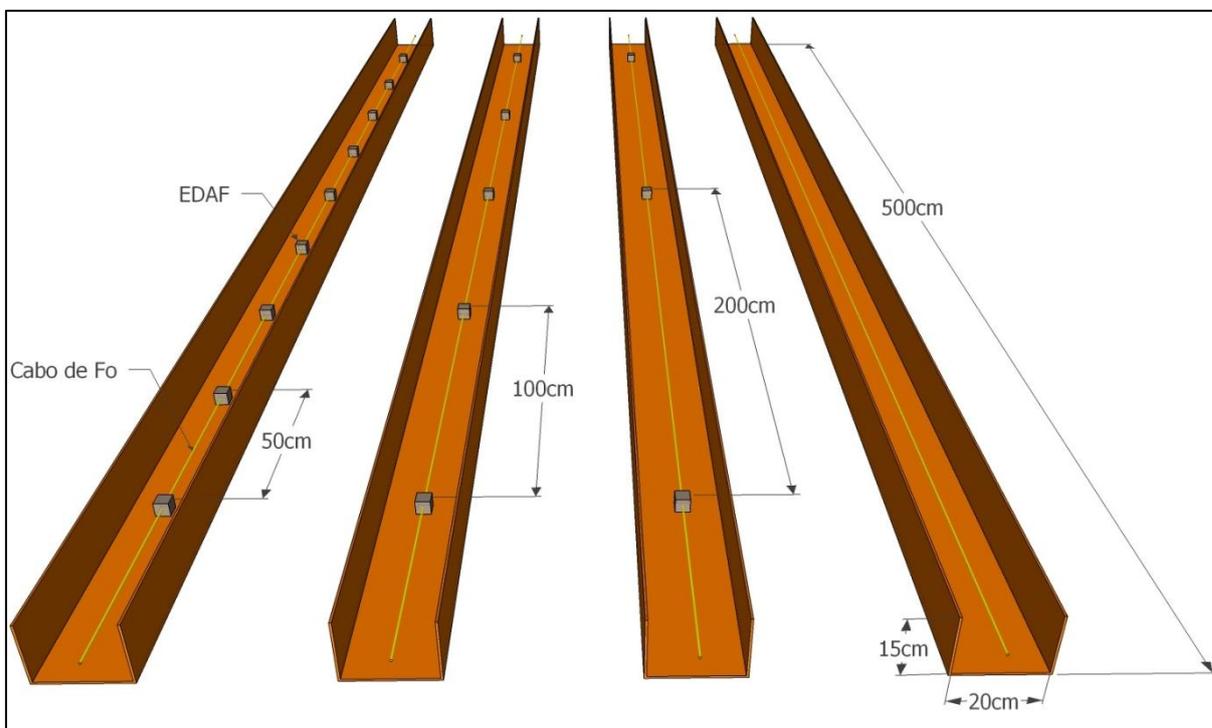


FIGURA 3.24. CONFIGURAÇÃO DOS TESTES DE ARRANCAMENTO

3.2.5 Simulação da zona de cisalhamento

Neste item encontram-se abordados os procedimentos de ensaio para identificar a zona de cisalhamento em um movimento de massa com a tecnologia de fibra óptica DTSS.

Assim como nos testes de arrancamento, os procedimentos de preenchimento do solo arenoso e posicionamento do cabo de fibra óptica foram os mesmos. A Figura 3.25 mostra a caixa de cisalhamento sendo preenchida com solo arenoso, em um dos ensaios, através do método de chuva de areia. A partir dos resultados obtidos nos testes de arrancamento optou-se por utilizar apenas os EDAF de 50 mm, pelos custos envolvidos na fabricação das peças e dos resultados obtidos nestes testes. Nos testes de arrancamento, durante a instalação dos EDAF

de 36 mm, verificou-se que o sinal era interrompido dependendo do torque que era aplicado quando os EDAF eram instalados no cabo de fibra óptica. Este fato deve-se à pequena área de contato entre a fibra óptica e a arruela do EDAF, que de forma pontual causava o esmagamento do núcleo, interrompendo a passagem da luz no interior da fibra óptica.



FIGURA 3.25. PREENCHIMENTO DA CAIXA DE CISALHAMENTO PELO MÉTODO DA CHUVA DE AREIA

Foram configurados cinco testes para simulação da zona de cisalhamento. O primeiro teste foi realizado sem a instalação das âncoras no cabo de fibra óptica. O segundo e o terceiro teste foram instalados os EDAF de 50 mm espaçados a cada 1,0 m no cabo de fibra óptica. E no quarto e quinto teste foram instalados os EDAF com 50 mm espaçados a cada 2,0 m no cabo de fibra óptica. O posicionamento dos EDAF na caixa de cisalhamento, nas cinco configurações citadas, é apresentado na Figura 3.26.



FIGURA 3.26. CONFIGURAÇÕES DOS ENSAIOS – CAIXA DE CISALHAMENTO

Após os ajustes iniciais (preenchimento da caixa com solo arenoso e posicionamento do cabo e EDAF), o ensaio foi iniciado configurando a unidade leitora DTSS para registrar as deformações no cabo de fibra óptica em intervalos de tempo de 2 em 2 minutos. O deslocamento da parte móvel da caixa de cisalhamento foi iniciado após 6 minutos do início do registro das deformações, com objetivo de utilizar as duas primeiras leituras de deformação no cabo, de 2 e 4 minutos, como referência para as demais leituras. A velocidade de deslocamento da parte móvel da caixa de cisalhamento foi estabelecida em 4 mm/min, com único objetivo de todos ensaios serem realizados da mesma forma, assim os resultados puderam ser confrontados entre si. Esta velocidade não foi determinada com base em teorias de dissipação de poropressão, uma vez que a areia utilizada nos ensaios encontrava-se na condição seca. A velocidade utilizada nos testes possibilitou que cada ensaio fosse realizado com tempo de duração de 50 minutos.

O tempo total para execução de cada experimento, desde o posicionamento da caixa, preenchimento do solo através do método da chuva de areia e instalação dos EDAF ao cabo de fibra óptica foi superior a 4 horas.

O deslocamento imposto de 20 cm na parte móvel da caixa de cisalhamento teve como objetivo fazer com que na zona de cisalhamento, por semelhança de triângulo, atingisse uma deformação de aproximadamente 2%, ou 20.000 $\mu\epsilon$ no cabo de fibra óptica (deformação máxima, apresentada no item 3.1.3). A Figura 3.27 ilustra a deformação teórica que o cabo de fibra óptica poderia ter após a deformação imposta no sistema. O cateto “a” indica o comprimento inicial do cabo na zona de cisalhamento, após a deformação imposta, indicada pelo cateto “b”, o cabo de fibra óptica passará de um comprimento inicial “a” para um comprimento final “c” (hipotenusa do triângulo formado), dividindo-se “c” por “a”, tem-se a deformação final no cabo de fibra óptica de aproximadamente 20.000 $\mu\epsilon$.

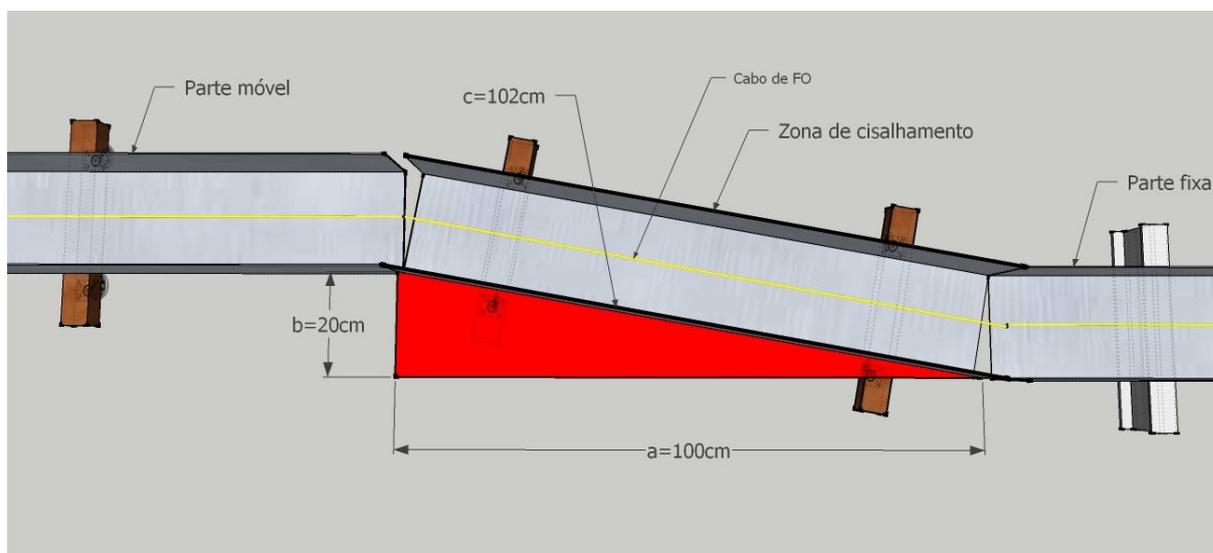


FIGURA 3.27. ILUSTRAÇÃO DA DEFORMAÇÃO NA ZONA DE CISALHAMENTO

Observa-se que este comportamento no cabo de fibra óptica é teórico e somente seria válido em uma condição em que o cabo estivesse perfeitamente ancorado entre pontos fixos nas extremidades da zona de cisalhamento. Na prática,

a deformação registrada na fibra óptica será sempre menor, pois a ancoragem do cabo está instalada em um sistema que sofre deformações, no caso, o solo. Desta forma serão registradas deformações além do trecho da zona de cisalhamento no cabo de fibra óptica, tanto à direita (na parte fixa), quando à esquerda (na parte móvel), pois as deformações serão dissipadas ao longo do comprimento do cabo em ambos os sentidos (Figura 3.27).

A Figura 3.28 a seguir, ilustra uma sequência de fotografias mostrando a evolução do deslocamento da parte móvel da caixa de cisalhamento a cada 20 mm.

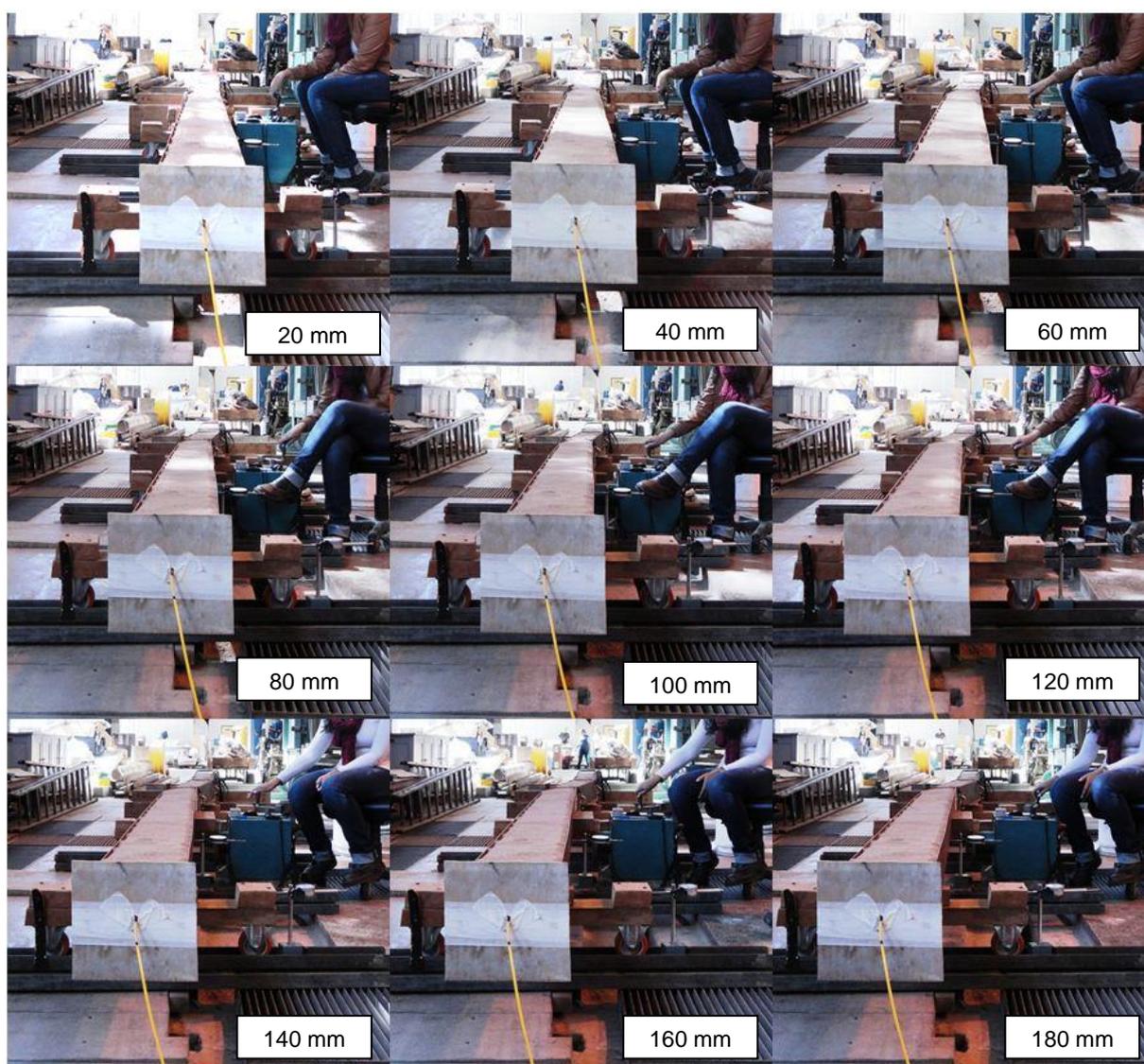


FIGURA 3.28. SEQUÊNCIA DO ENSAIO PARA SIMULAÇÃO NA ZONA DE CISALHAMENTO

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão abordados os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa, os quais serão analisados e discutidos na medida em que forem apresentados. Serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do solo arenoso utilizado nos experimentos, testes de arrancamento com e sem utilização de elementos de ancoragem (EDAF) no cabo de fibra óptica e a simulação da zona de cisalhamento.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO ARENOSO

Neste item estão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica do solo arenoso: massa específica dos grãos, análise granulométrica, índice de vazios máximos e índice de vazios mínimos. Também é apresentado o resultado da calibração da chuva de areia.

O resultado do ensaio de massa específica dos grãos foi obtido a partir da média aritmética entre três determinações. Salienta-se que as determinações não deviam apresentar diferenças de $\pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ entre si, conforme recomendações da ABNT NBR 6508:1984. Os valores da massa específica dos grãos obtidas nos ensaios se encontram apresentados na Tabela 4.1.

TABELA 4.1. RESULTADO DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS

Amostra	Ensaio 01 $\rho_{01} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	Ensaio 02 $\rho_{02} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	Ensaio 03 $\rho_{03} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	Média $\bar{\rho} \text{ (g/cm}^3\text{)}$
Areia	2,67	2,67	2,68	2,67

A curva de distribuição granulométrica obtida a partir do ensaio de peneiramento simples da areia utilizada nos testes está apresentada na Figura 4.1.

Como pode ser observado na figura citada, é possível classificar o solo, de acordo com a ABNT NBR 6502:1995, como uma areia de granulometria grossa, pois a maior porção do solo encontra-se na faixa de abertura de peneiras entre 0,6 mm e 2,0 mm, com uma tendência uniforme.

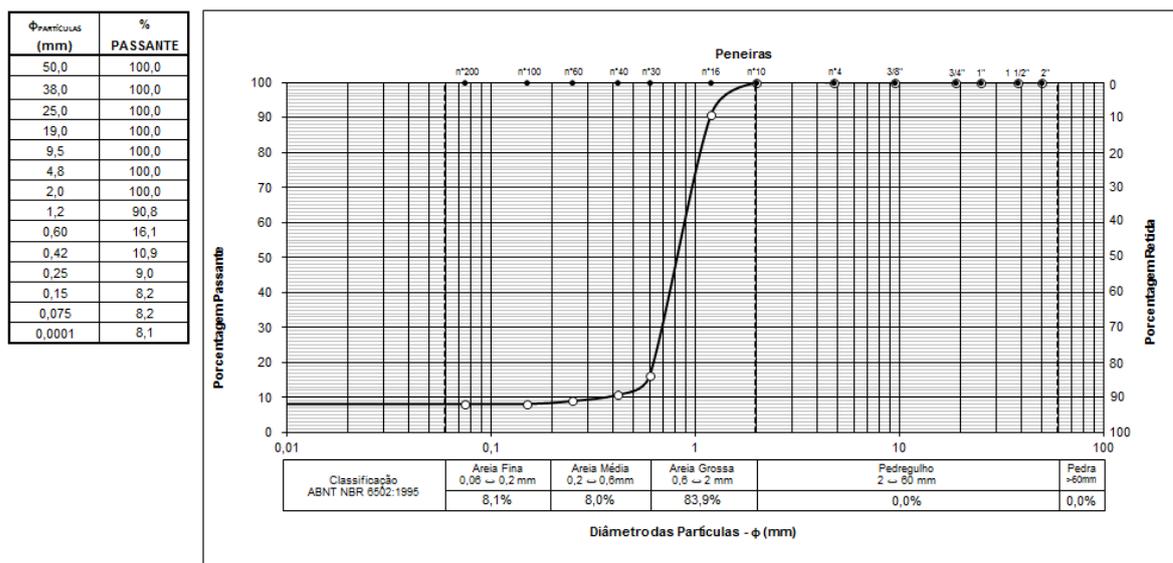


FIGURA 4.1. CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Os valores de índice de vazios máximo e mínimo, obtidos a partir dos procedimentos de ensaio citados no item 3.2.1, foram de 0,79 e 0,51, respectivamente. A partir destes valores foi possível à determinação da compactidade relativa (CR), que correlaciona os valores de índice de vazios máximo ($e_{máx}$), índice de vazios mínimo ($e_{mín}$) e com o índice de vazios do solo (e). A compactidade relativa pode ser obtida através da Equação 4.1. A partir deste valor, solos granulares podem ser classificados como exposto na Tabela 4.2.

$$CR = \frac{e_{máx} - e}{e_{máx} - e_{mín}} \quad (\text{EQUAÇÃO 4.1})$$

TABELA 4.2. COMPACIDADE DE SOLOS GRANULARES (PINTO, 2006)

Compacidade relativa	Classificação
CR \leq 1/3	Areia fofa
1/3 < CR \leq 2/3	Areia de compacidade média
CR > 2/3	Areia compacta

4.2 CALIBRAÇÃO DA CHUVA DE AREIA

Os valores pré-determinados para as alturas de queda da calibração da chuva de areia, de 5 a 20 cm, compreenderam as classificações de areia compacta e areia mediamente compacta. Os valores da calibração estão apresentados na Tabela 4.3.

TABELA 4.3. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA CHUVA DE AREIA

Altura de queda (cm)	Massa específica seca (g/cm³)	Média do índice de vazios	Compacidade relativa (%)
5	1,58	0,69	36
10	1,62	0,64	49
15	1,65	0,62	61
20	1,69	0,58	74

Na Figura 4.2 pode ser observada: a limitação entre o índice de vazios máximo e mínimo (linhas tracejadas); o índice de vazios que delimita a classificação quanto à compacidade de solos granulares (linhas traço-ponto); e os valores de índice de vazios para cada altura de queda estabelecida. Observa-se que este procedimento foi realizado para que em todos os experimentos o solo fosse moldado sempre com densidades muito próximas entre si e com compacidade compacta, já que para densidades menores, ou de índice de vazios maiores, qualquer tipo de

vibração durante a execução dos testes poderia fazer com que o solo se tornasse mais compacto.

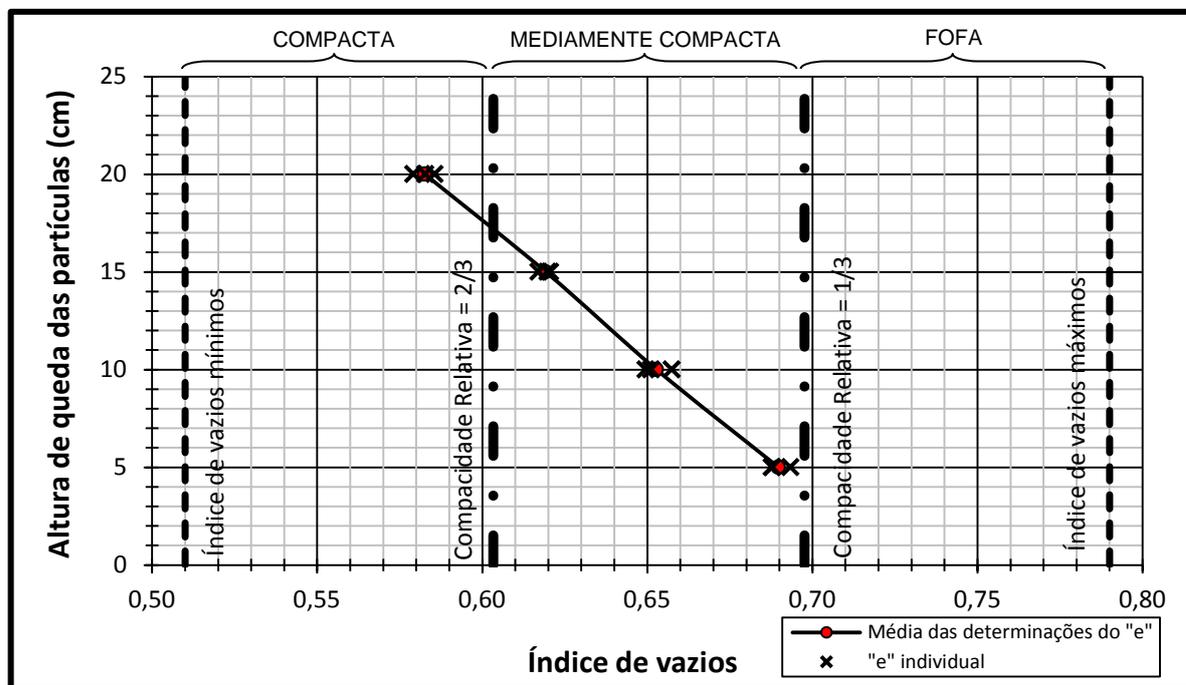


FIGURA 4.2. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA CHUVA DE AREIA

4.3 VERIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS DE ANCORAGEM DO CABO DE FIBRA ÓPTICA

O primeiro teste foi realizado com o prensa-cabos denominado “*Tipo 1*”. Os procedimentos de ensaios foram descritos no item 3.2.3. O formato deste prensa-cabos é apresentado na Figura 4.3. Quando foram conduzidos os testes de tração e verificação do escorregamento dos EDAF instalados no cabo de fibra óptica, o prensa-cabos citado apresentou resultados satisfatório, sem a identificação de escorregamento em relação à fibra óptica, até a deformação de 0,5%, ou de 4.000 $\mu\epsilon$. Após a deformação imposta no experimento, o sistema de ancoragem passou a escorregar no cabo de fibra óptica.



FIGURA 4.3. PRENSA-CABOS TIPO 1

O gráfico apresentado na Figura 4.4, mostra a evolução das deformações impostas no sistema. No eixo vertical são apresentadas as deformações gravadas na unidade leitora e, no eixo horizontal é apresentado o trecho do cabo ancorado. Cada linha mostrada no gráfico representa a deformação imposta no experimento. Este modelo de apresentação gráfica também será utilizado na Figura 4.7 (prensa-cabos *Tipo 2*) e na Figura 4.9 (sistema integrado).

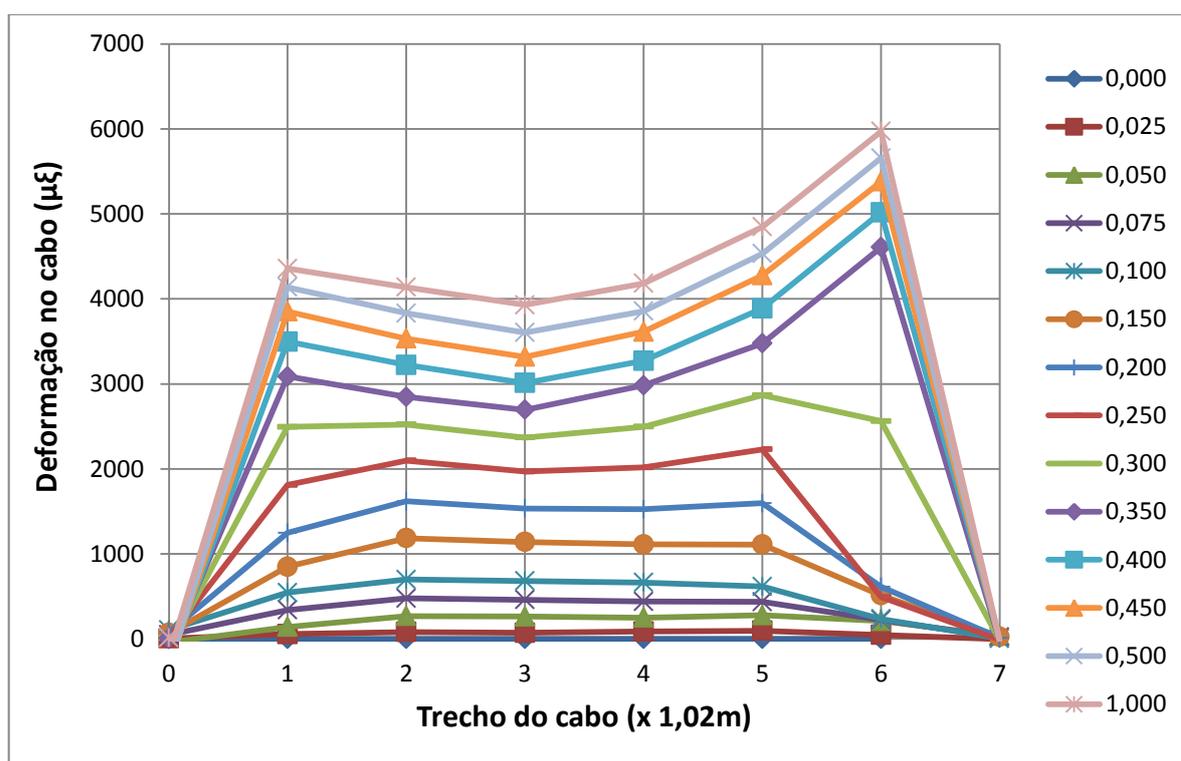


FIGURA 4.4. DEFORMAÇÕES AO LONGO DO CABO DE FIBRA ÓPTICA (PRENSA-CABOS TIPO 1)

Nota-se que os pontos 0 e 7 não apresentam deformações, pois estes pontos encontram-se fora do trecho ancorado do cabo de fibra óptica, ou seja, não estavam sendo tracionados. Os pontos 1 a 6 apresentam deformações, portanto

estavam sob influência direta da tensão de tracionamento no trecho ancorado. Observa-se que cada um destes pontos equivalem à distância de resolução da fibra óptica, que é de 1,02 metros (medida do espectro de *Brillouin*, apresentada no item 3.1.6). A distância entre os pontos fixos de ancoragem estavam espaçadas a uma distância de 5,60 metros, conforme foi apresentado na Figura 3.21. Dividindo-se esta distância pela resolução da fibra, tem-se 5,5 pontos que estariam sob influência das deformações impostas no sistema. Desta forma conclui-se que 5 pontos estavam sob influência direta das deformações impostas no trecho ancorado e 1 ponto estaria influenciado tanto pelo trecho livre do cabo quanto pelo trecho ancorado.

As características apresentadas são observadas no gráfico da Figura 4.5, onde no eixo horizontal é apresentada a deformação aplicada no sistema e no eixo vertical a deformação registrada na unidade leitora DTSS (modelo gráfico apresentado também na Figura 4.8, Figura 4.10 e Figura 4.11). Nota-se que a curva do ponto 6 não tem um comportamento linear, como as registradas nos pontos 1 a 5, isto indica que o ponto 6 estava parcialmente influenciado pelo trecho ancorado e parcialmente influenciado pelo trecho livre do cabo de fibra óptica.

A partir dos resultados deste teste, com o prensa-cabos “*Tipo 1*”, conclui-se que é possível obter uma boa correlação ($R^2=0,992$) entre as deformações impostas e as deformações lidas no sistema DTSS até deformações próximas a 4.000 $\mu\epsilon$. Após este nível de deformações o sistema de prensa-cabos não é eficiente.

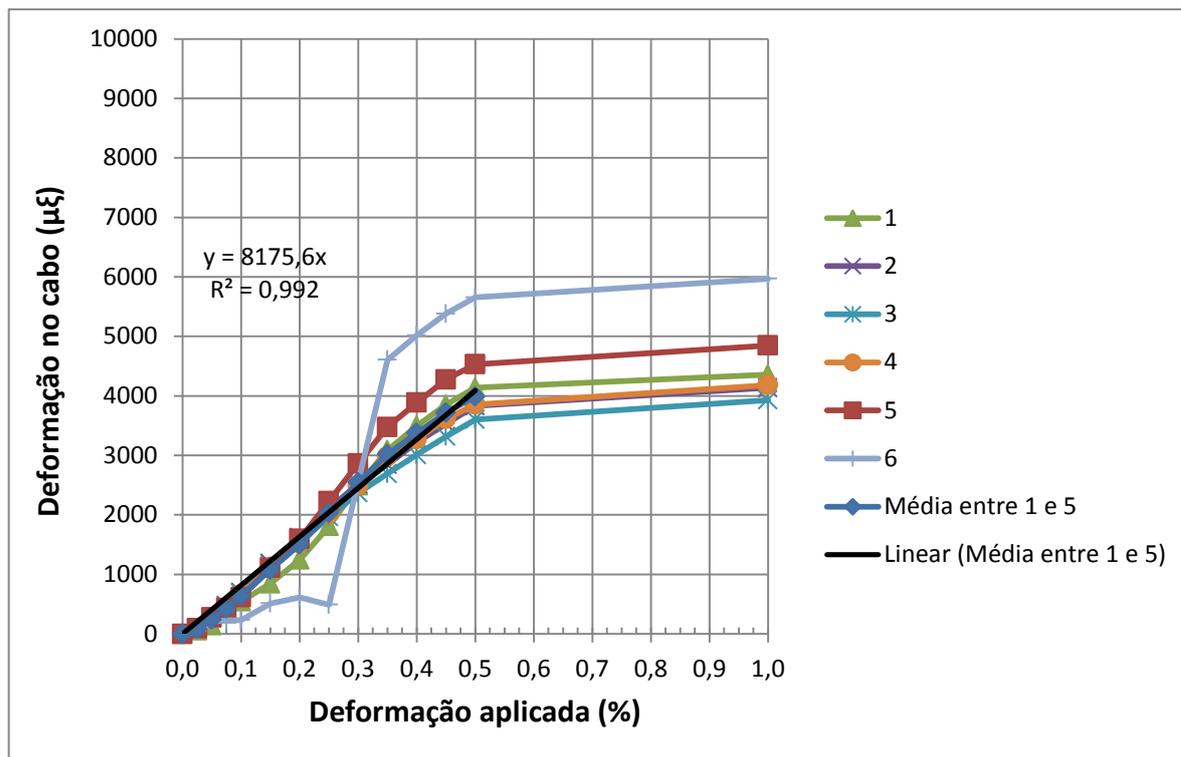


FIGURA 4.5. DEFORMAÇÕES IMPOSTAS *VERSUS* DEFORMAÇÕES REGISTRADAS (PRENSA-CABOS TIPO 1)

O segundo teste foi realizado com o prensa-cabos denominado como “*Tipo 2*”, apresentado na Figura 4.6. A evolução do sistema de prensa-cabos *Tipo 1* para o *Tipo 2* deu-se a partir da eficiência que um sistema cônico poderia oferecer ao se prender ao cabo de fibra óptica.



FIGURA 4.6. PRENSA-CABOS TIPO 2

Os resultados deste experimento, com a utilização do prensa-cabos *Tipo 2*, estão apresentados a seguir na Figura 4.7 e na Figura 4.8.

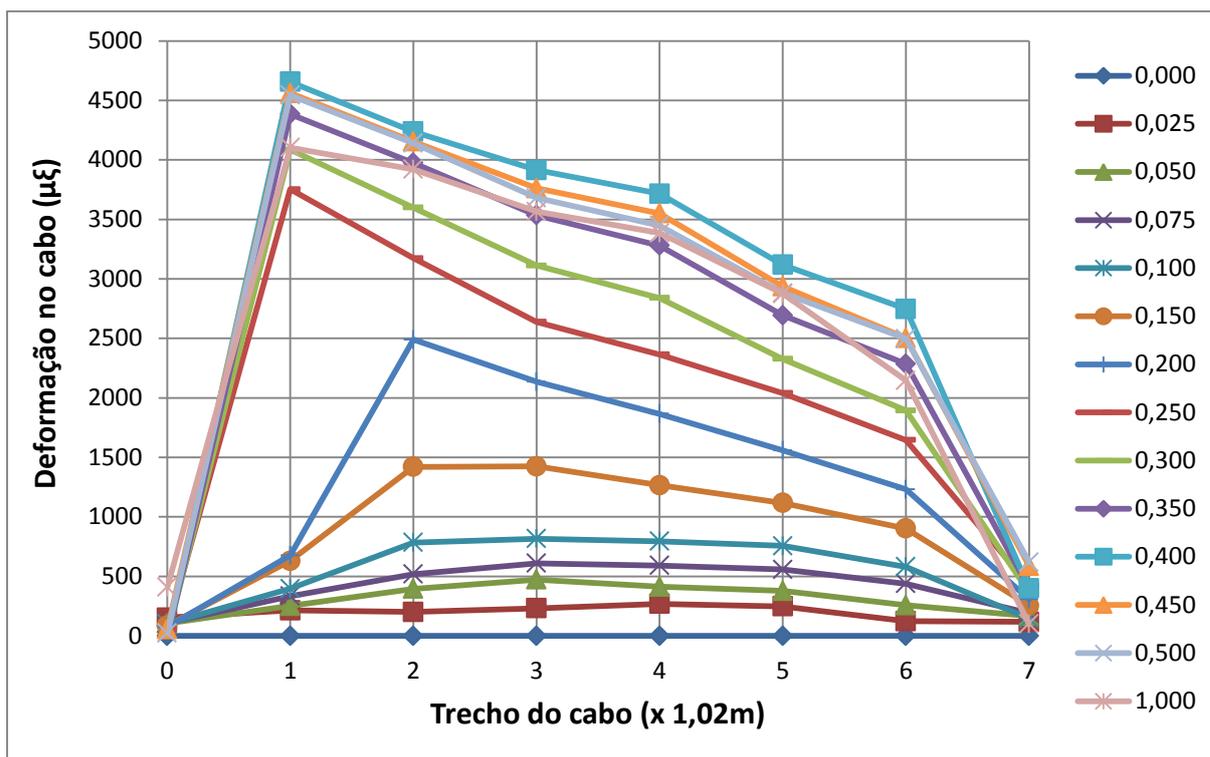


FIGURA 4.7. DEFORMAÇÕES AO LONGO DO CABO DE FIBRA ÓPTICA (PRENSA-CABOS TIPO 2)

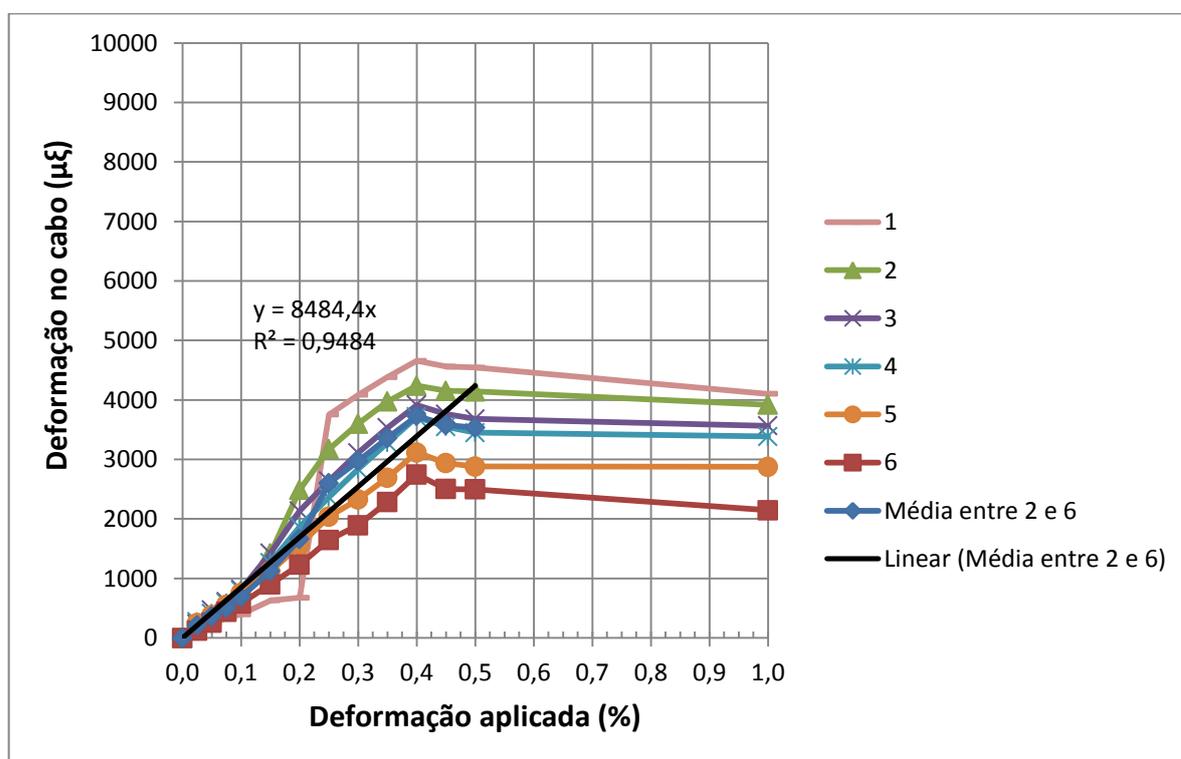


FIGURA 4.8. DEFORMAÇÕES IMPOSTAS VERSUS DEFORMAÇÕES REGISTRADAS (PRENSA CABOS TIPO 2)

Na Figura 4.7, observa-se que os pontos 0 e 7, praticamente não sofreram deformações, portanto, pode-se concluir que estes pontos estavam fora do trecho ancorado.

Na Figura 4.8, nota-se que o 1º trecho do cabo não tem um comportamento linear, como observado nos trechos de 2 a 6. Isto indica que o 1º trecho do cabo estava sob influência parcial do trecho ancorado e do trecho livre do cabo. Analisando-se os resultados dos prensa-cabos *Tipo 1* e *Tipo 2*, conclui-se que este sistema não apresentou melhoras na sensibilidade do sinal das deformações registradas, que foram em torno de 4000 $\mu\epsilon$. Entretanto, o prensa-cabos *Tipo 2* era mais prático no momento da instalação da âncora ao cabo de fibra óptica (conclusão obtida com a experiência da instalação dos EDAF ao cabo de fibra óptica nos testes realizados).

O terceiro teste utilizou o novo modelo de ancoragem desenvolvido (EDAF com sistema de prensa-cabos integrados), demonstrado na Figura 3.15. A Figura 4.9 apresenta uma fotografia desta âncora. Os gráficos apresentados na Figura 4.10 e Figura 4.11 mostram os resultados obtidos neste experimento.

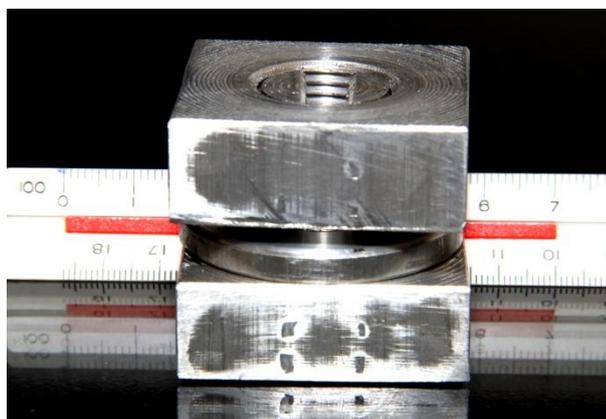


FIGURA 4.9. EDAF COM SISTEMA DE PRENSA-CABOS INTREGADOS

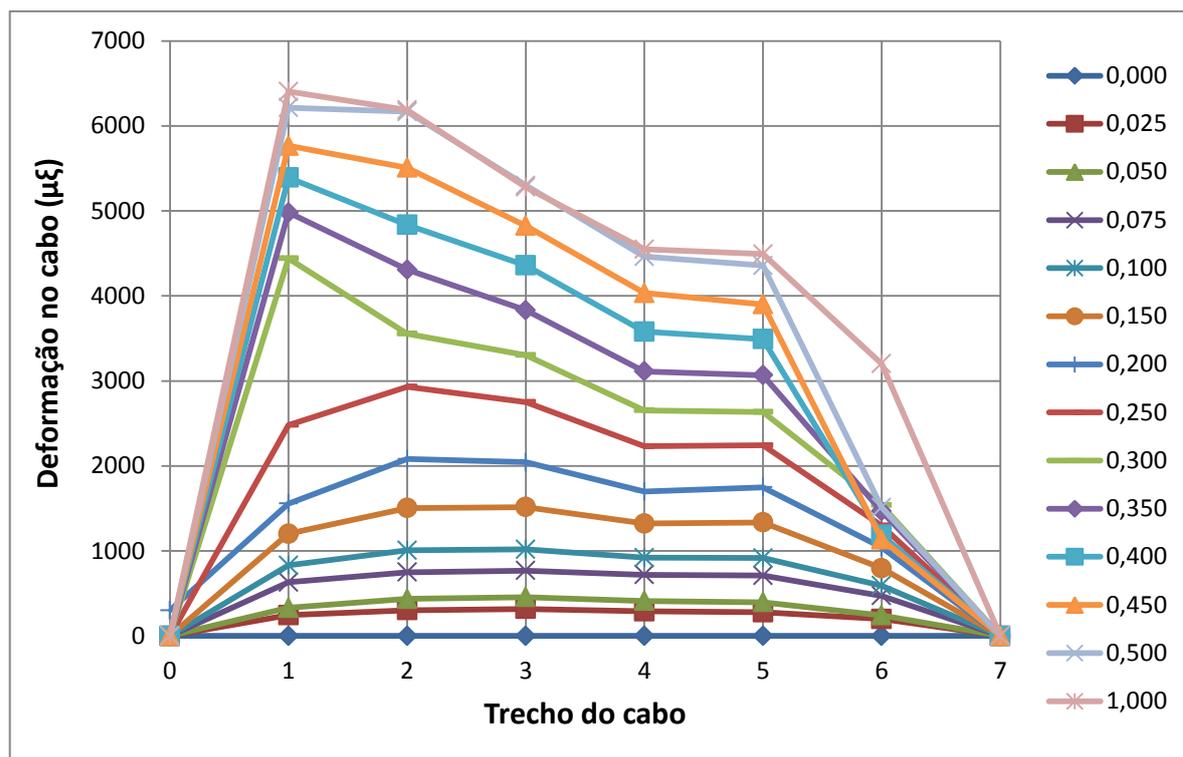


FIGURA 4.10. DEFORMAÇÕES AO LONGO DO CABO DE FIBRA ÓPTICA (SISTEMA INTEGRADO)

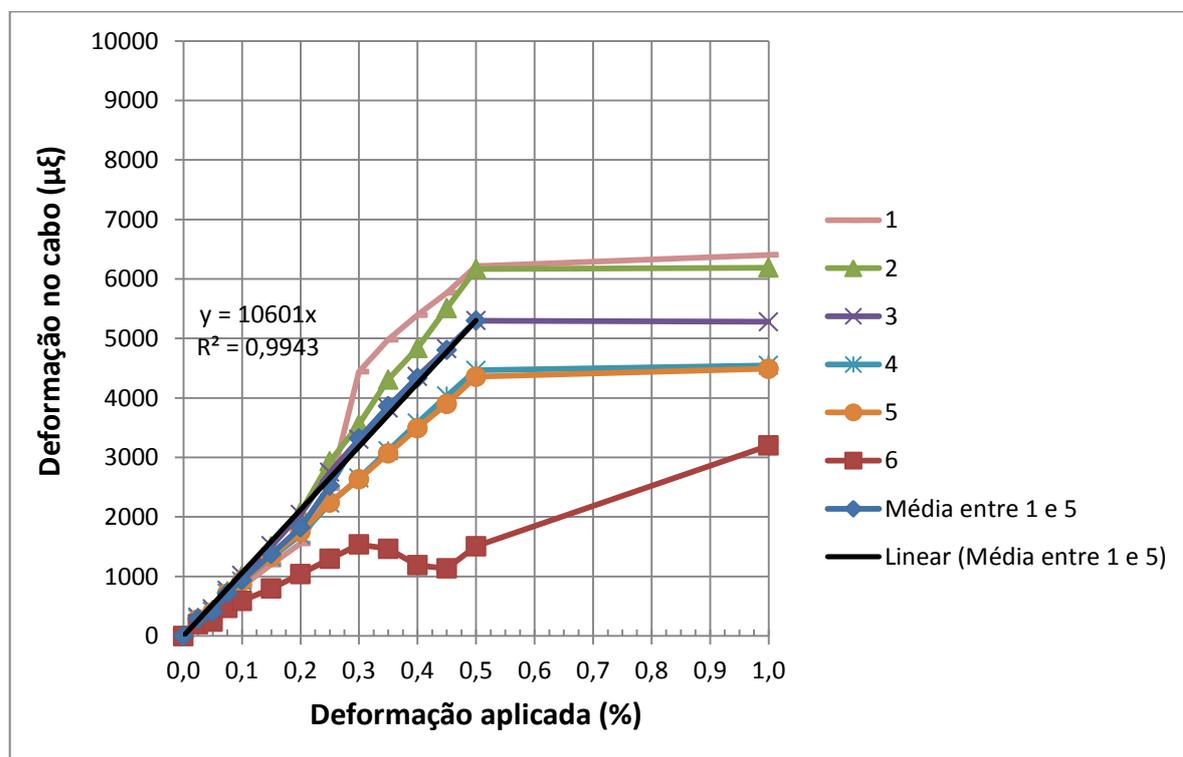


FIGURA 4.11. DEFORMAÇÕES IMPOSTAS VERSUS DEFORMAÇÕES REGISTRADAS (SISTEMA INTEGRADO)

A máxima deformação registrada com este sistema foi superior a 6000 $\mu\xi$, contra os 4000 $\mu\xi$ obtidos com os dois sistemas utilizando prensa-cabos em *Nylon Tipo 1 e Tipo 2*, apresentados anteriormente (ganho de 50% nos sinais de

deformação registrados). O comportamento gráfico para ambos os testes foram sempre os mesmos. Sendo os pontos da extremidade direita e esquerda, pontos 0 e 7, sem acréscimo de deformações; um único ponto com deformações não lineares, indicado que este trecho do cabo estava sob influência de um trecho parcialmente tracionado e um trecho sem deformação ao longo de 1,02 m de fibra óptica; e 5 pontos com deformações lineares entre si.

A partir dos experimentos realizados, conclui-se que o EDAF com sistema de prensa-cabos integrado é mais eficiente quando comparado com os modelos com sistema de prensa-cabos em *Nylon*. Nos testes, com o EDAF com sistema de prensa-cabos integrados, foi possível observar que a âncora não escorregava no cabo (proteção externa do cabo, apresentada na Figura 3.10), entretanto a fibra óptica era escorregada. Este fato deve-se que as fibras ópticas, no modelo de cabo utilizado nos experimentos, ficam presas apenas pelo confinamento da proteção externa do cabo. O gráfico da Figura 4.12 apresenta a comparação entre os modelos de ancoragem do cabo de fibra óptica estudados. Neste gráfico é mostrado apenas as deformações do cabo indicado como ponto 2 de cada teste.

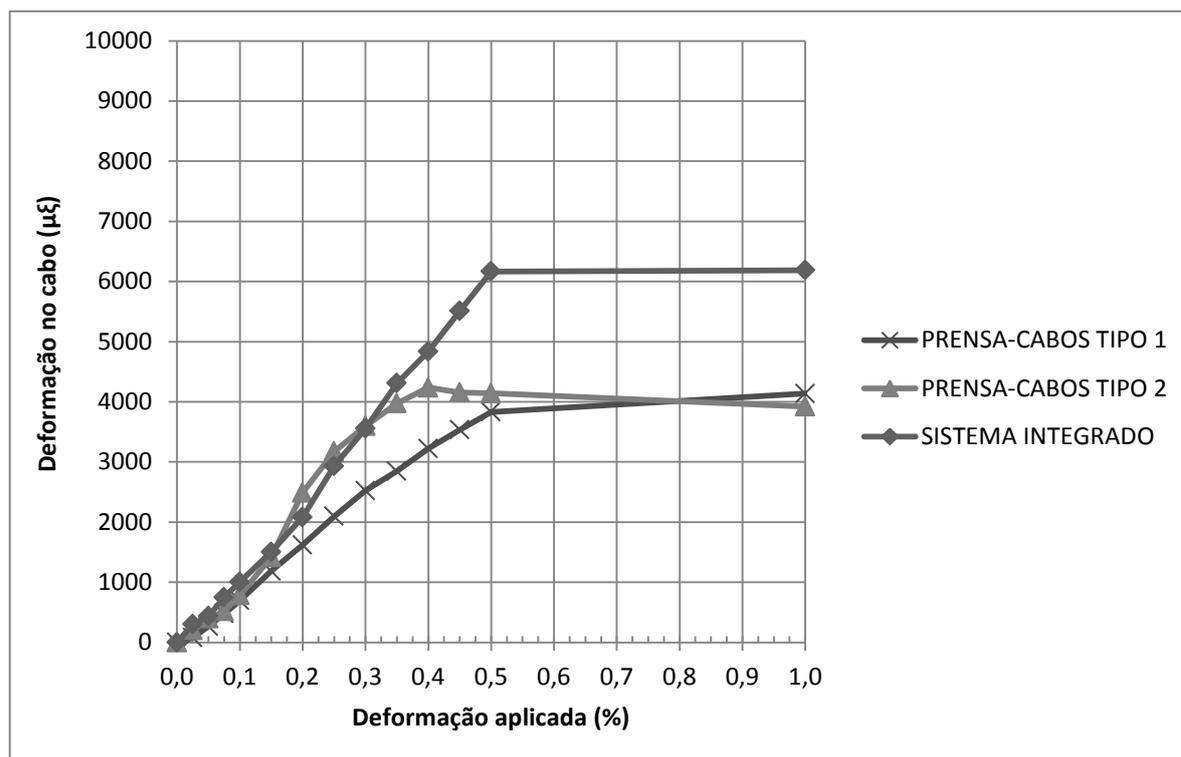


FIGURA 4.12. COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE PRENSA-CABOS

4.4 TESTES DE ARRANCAMENTO

Os testes de arrancamento realizados totalizaram 10 combinações de posicionamento de instalação dos EDAF no cabo de fibra óptica. As combinações estabelecidas para os testes estão apresentadas na Tabela 4.4.

TABELA 4.4. COMBINAÇÕES DOS TESTES DE ARRANCAMENTO

Nº do Ensaio	Dimensão do EDAF	Espaçamento no cabo (cm)	Índice de vazios
1	Sem EDAF	-	0,57
2	25	50	0,58
3		100	0,56
4		200	0,56
5		50	0,57
6	36	100	0,58
7		200	0,58
8		50	0,57
9	50	100	0,57
10		200	0,56

Os testes de arrancamento serão interpretados analisando a interação cabo-solo, verificando o nível de deformação máxima registrada na unidade leitora DTSS (em $\mu\epsilon$); a qual provocará ruptura desta interação (força de atrito entre o solo e o cabo de fibra óptica), ou seja, no momento em que o cabo é tracionado e não são observados acréscimos das deformações registradas. A Figura 4.13 ilustra as forças atuantes neste experimento.



FIGURA 4.13. INTERAÇÃO CABO-SOLO NOS TESTES DE ARRANCAMENTO

A Figura 4.14 apresenta um gráfico do Ensaio N^o1, sem EDAF, com a evolução das deformações no eixo vertical e o comprimento do cabo no eixo horizontal. O trecho zero no eixo horizontal representa o Ponto fixo 2 e o trecho seis o Ponto fixo 1, no sistema de tracionamento do cabo de fibra óptica.

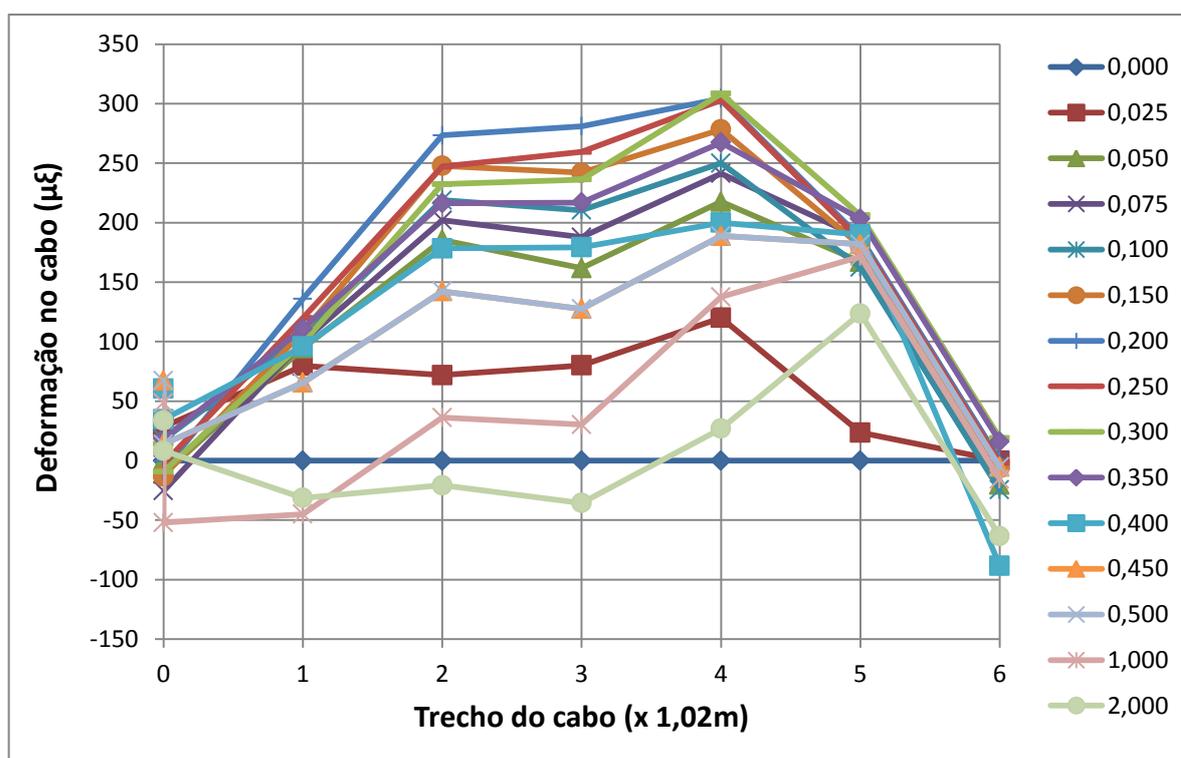


FIGURA 4.14. TRECHO DO CABO VERSUS DEFORMAÇÃO NO CABO (SEM EDAF)

No gráfico anterior, analisando apenas o quarto metro do cabo de fibra óptica, nota-se que a máxima deformação registrada no experimento foi de aproximadamente 300 $\mu\epsilon$.

No gráfico da Figura 4.15 (Ensaio N^o1), onde o eixo vertical apresenta a deformação no cabo e o eixo horizontal apresenta a deformação imposta no sistema, pode ser percebido o momento em que a interação cabo-solo é superada pela força de atrito em cada metro da fibra. Nota-se que a partir de 0,2% de deformação imposta no sistema, não há mais acréscimo das deformações (momento em que o atrito entre o cabo de fibra óptica e o solo é superado). As deformações decrescentes indicam que o cabo de fibra óptica está relaxando (alívio de tensões no cabo) e as deformações negativas, podem ser interpretadas como forças de compressão no cabo de fibra óptica, uma vez que na instalação do cabo, este é protendido até que a deformação seja próxima a 1500 $\mu\epsilon$, como citado no item 3.2.4, ou seja, as deformações no cabo de fibra óptica são menores que 1500 $\mu\epsilon$.

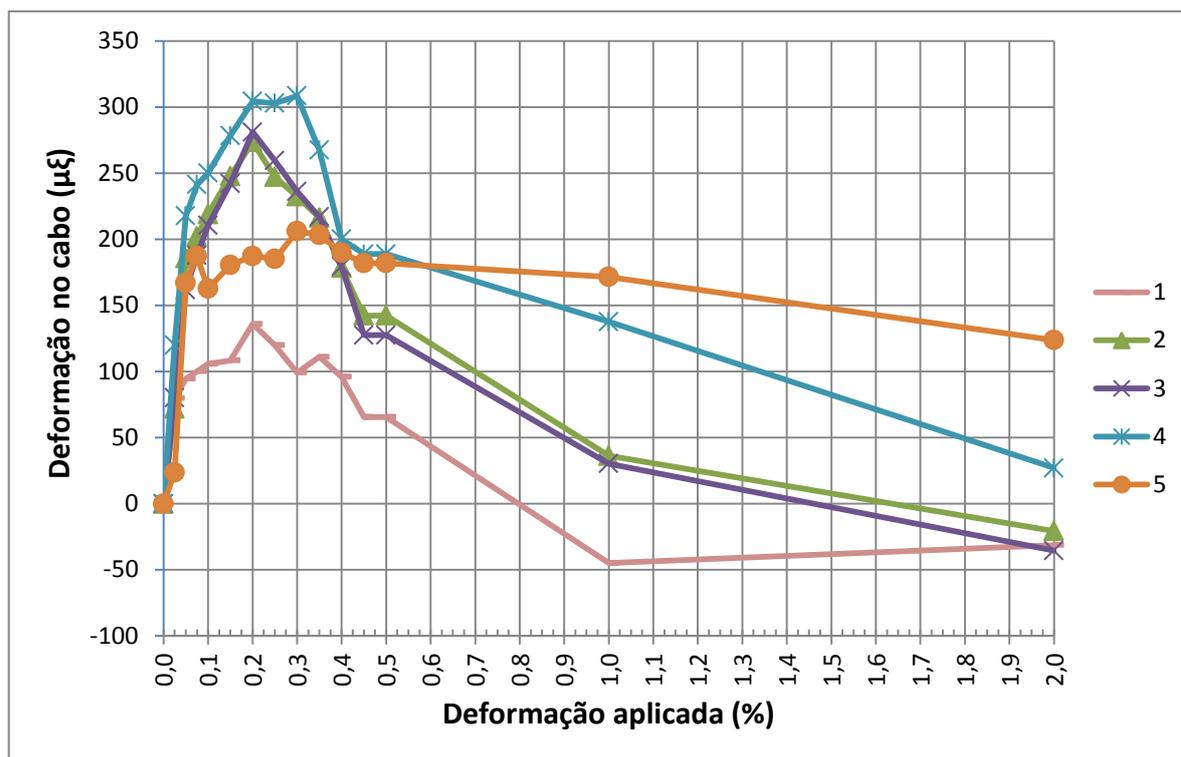


FIGURA 4.15. DEFORMAÇÃO APLICADA *VERSUS* DEFORMAÇÃO NO CABO (SEM EDAF)

No ensaio N°2 (Figura 4.16), com EDAF de 25 mm a cada 2,0 m, a deformação máxima registrada foi de aproximadamente 1400 $\mu\epsilon$, no terceiro e quarto trecho do cabo. Considerando que a distância entre os trechos 4 e 6 do cabo de fibra óptica é de 2,04 m, nota-se que o resultado é coerente, pois a distância entre o Ponto fixo 1 e a primeira âncora neste ensaio foi de 2,0 m.

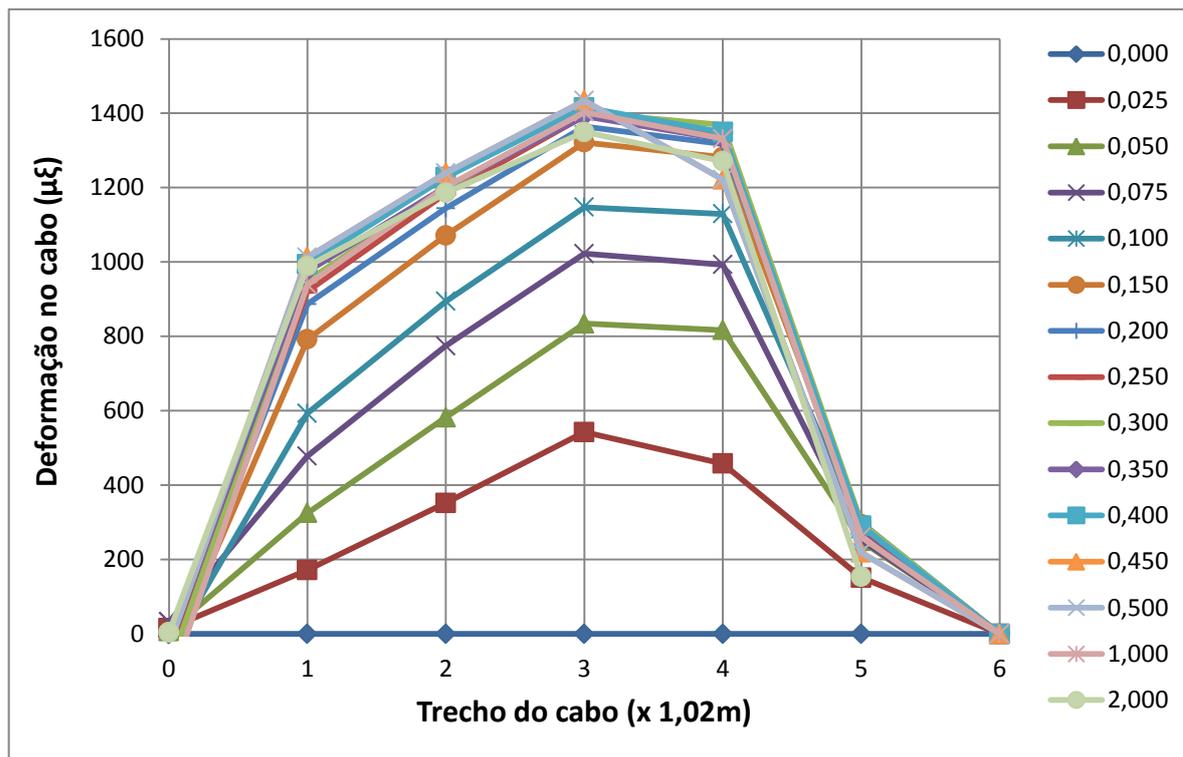


FIGURA 4.16. TRECHO DO CABO *VERSUS* DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 25 MM A CADA 2,0 M)

O gráfico da Figura 4.17 mostra que após a ruptura da interação cabo-solo, ou neste caso EDAF-solo, não há decréscimo das deformações, pois os EDAF mantêm o cabo tracionado no trecho entre âncoras. No primeiro ensaio com a utilização dos EDAF é nítida a eficiência que o sistema de ancoragem proporciona um ganho no sinal das deformações, que neste caso foi de 300 $\mu\epsilon$ (ensaio N°1) para 1400 $\mu\epsilon$ (ensaio N°2), ou seja, o ganho do sinal das deformações no cabo foi de aproximadamente 360%.

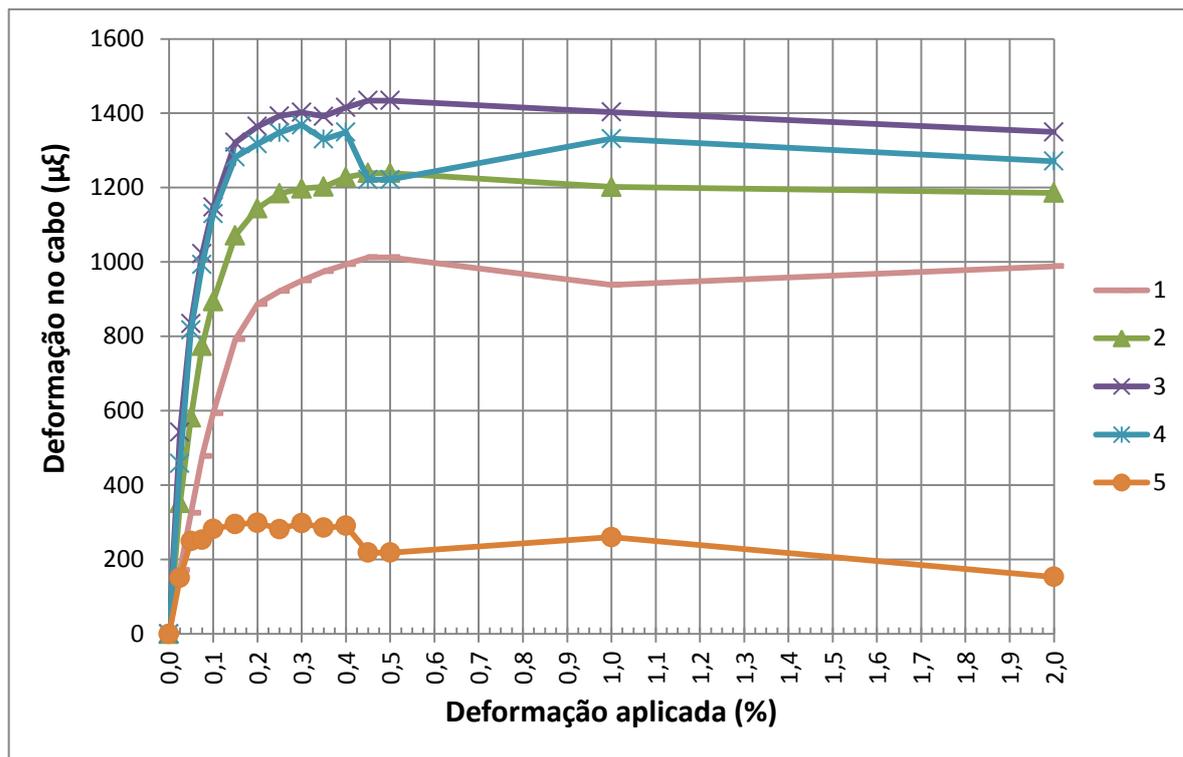


FIGURA 4.17. DEFORMAÇÃO APLICADA *VERSUS* DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 25MM A CADA 2,0 M)

No ensaio N°3, com EDAF a cada 1,0 m, a deformação máxima registrada foi de aproximadamente 1800 $\mu\epsilon$ (Figura 4.18). Nota-se que as maiores deformações estão logo no primeiro metro, no trecho 5 do cabo de fibra óptica, após o sistema de tracionamento (Ponto fixo 1). Assim pode-se comprovar a sensibilidade do sensor DTSS, comparando os resultados entre os ensaios N°2 e N°3.

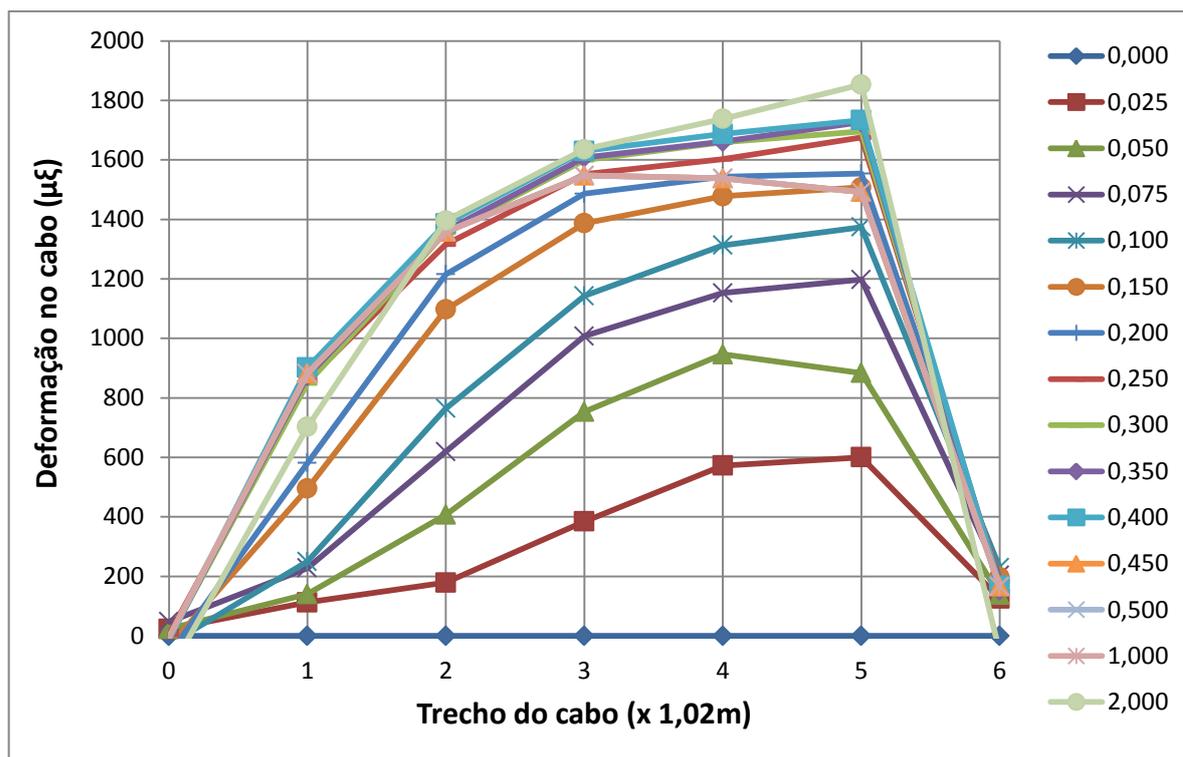


FIGURA 4.18. TRECHO DO CABO *VERSUS* DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 25 MM A CADA 1,0 M)

No gráfico da Figura 4.19 é possível observar a evolução das deformações no cabo ao longo do experimento. Comparando este ensaio com o ensaio sem EDAF, a deformação máxima registrada foi de aproximadamente 1800 $\mu\xi$ (ensaio N°3) contra 300 $\mu\xi$ (ensaio N°1), ou seja, o ganho no sinal foi de 500%.

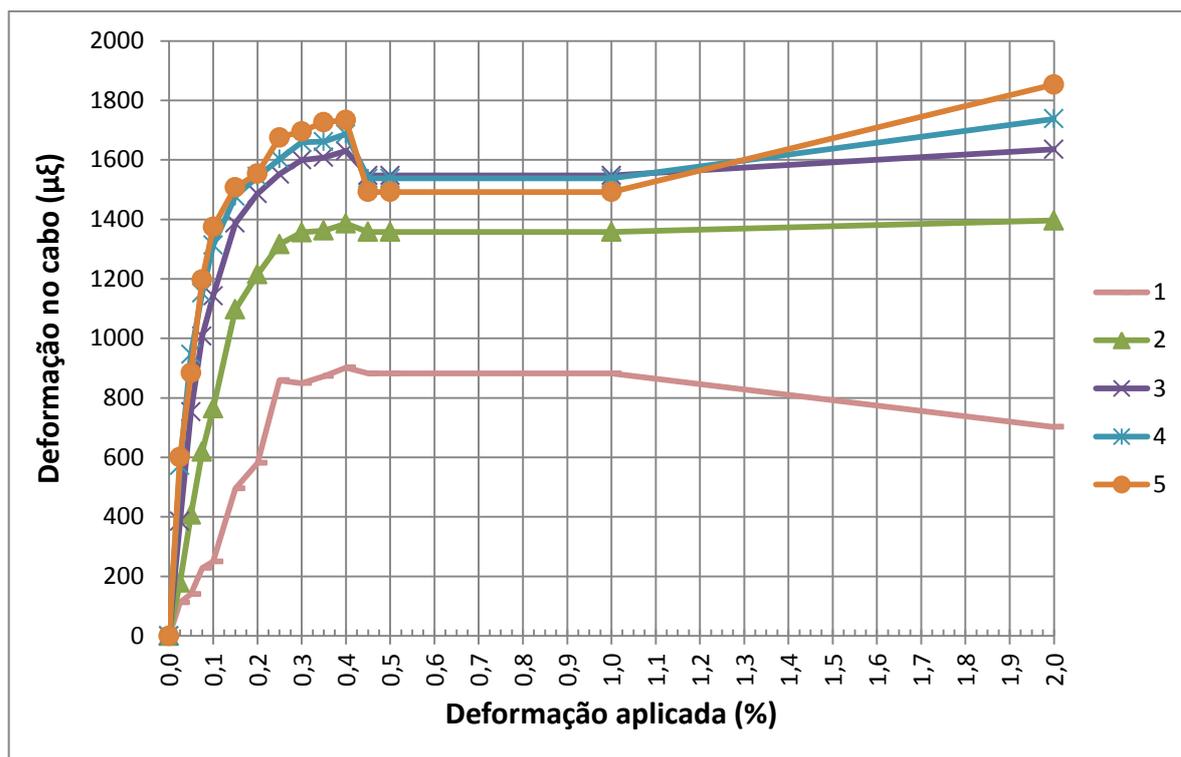


FIGURA 4.19. DEFORMAÇÃO APLICADA *VERSUS* DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 25 MM A CADA 1,0 M)

A Figura 4.20 e a Figura 4.21, apresentam os resultados do ensaio N°4, com EDAF de 25 mm a cada 0,5 m. Nota-se que a maiores deformações foram registradas no primeiro metro do cabo, após o sistema de tracionamento (Ponto fixo 1), assim como no ensaio N°3, já citado. Embora o comportamento gráfico seja muito parecido, a principal diferença está no nível máximo de deformação registrado, que foi 3500 $\mu\epsilon$ contra 1800 $\mu\epsilon$ do ensaio N°3.

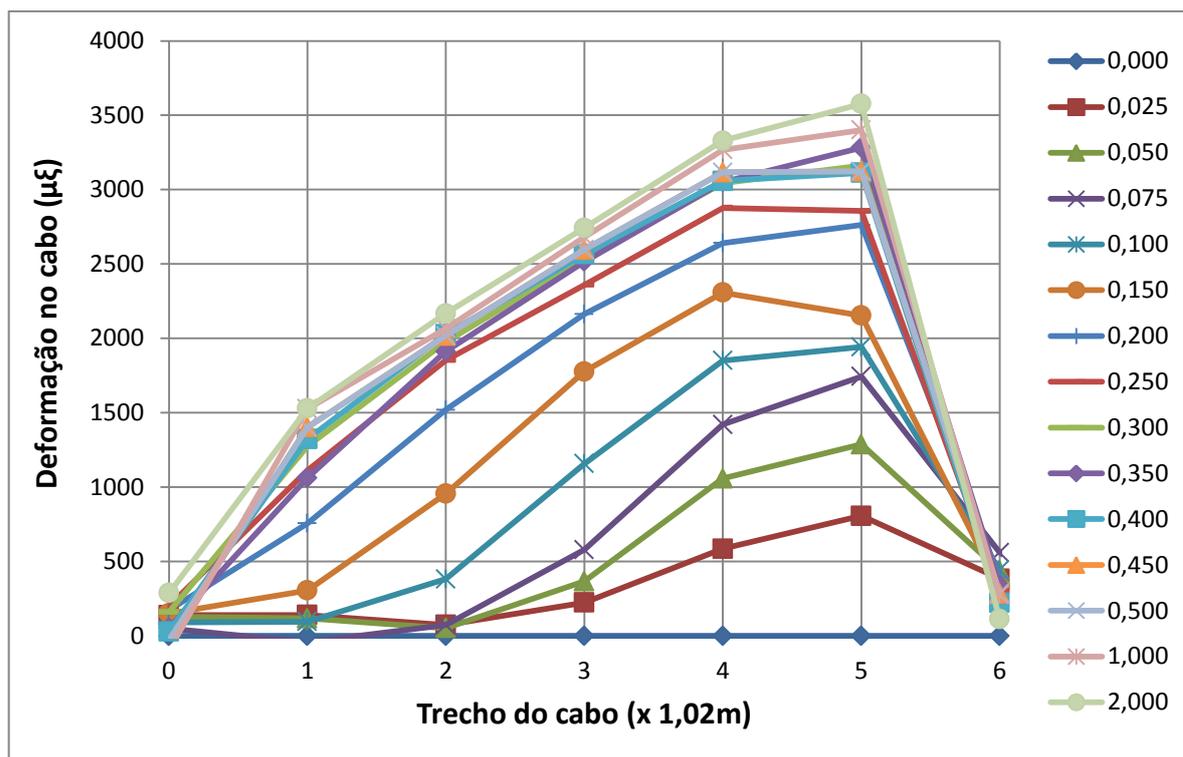


FIGURA 4.20. TRECHO DO CABO *VERSUS* DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 25 MM A CADA 0,5 M)

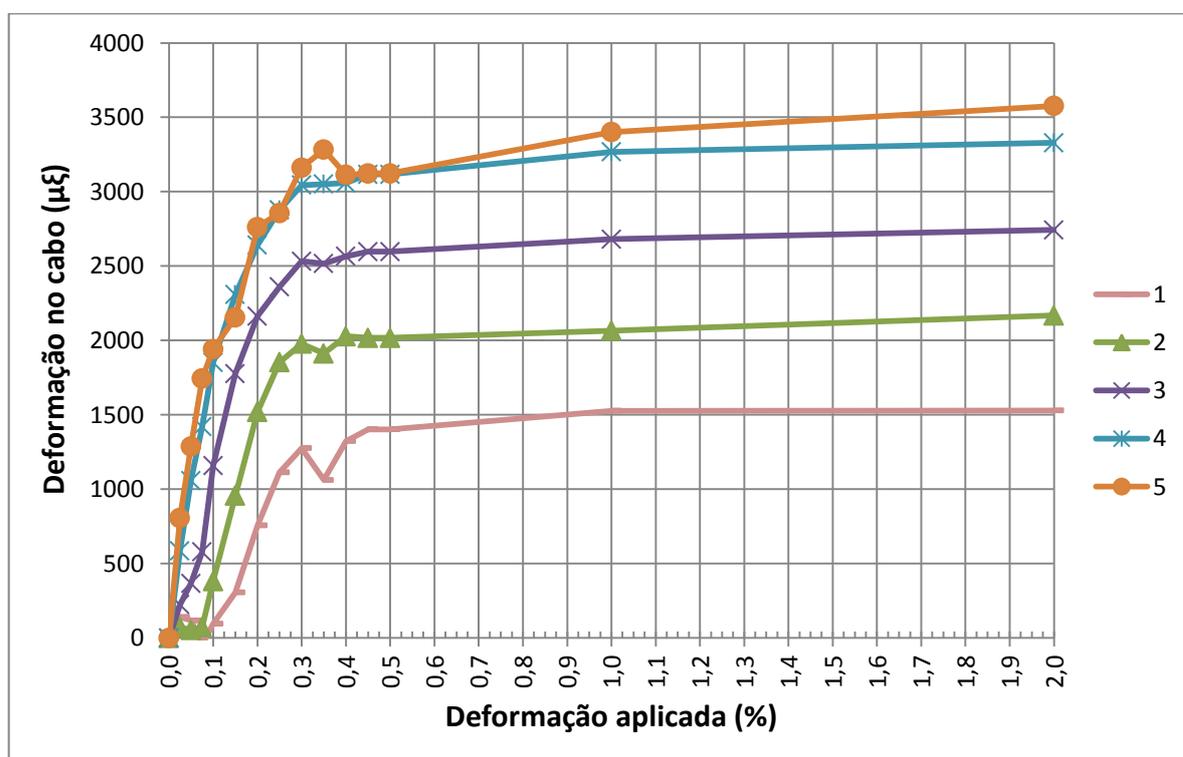


FIGURA 4.21. DEFORMAÇÃO APLICADA *VERSUS* DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 25 MM A CADA 0,5 M)

Os gráficos das figuras seguintes (Figura 4.22 a Figura 4.33) apresentarão os resultados obtidos nos experimentos com EDAF de diferentes dimensões, conforme o exposto na Tabela 4.4. O comportamento gráfico entre os ensaios são

bastante similares entre si. Quando os EDAF são instalados a cada 2,0 metros, as maiores deformações no cabo serão registrados no segundo trecho do cabo após o sistema de tracionamento (Ponto fixo 1). Quando os espaçamentos entre âncoras é menor, como por exemplo a cada 1,0 m ou a cada 0,5 m, as maiores deformações serão registradas logo no primeiro trecho do cabo, após o Ponto fixo 1. A diferença entre os resultados com os EDAF espaçados a cada 1,0 m e a cada 0,5 m será no nível de deformação registrado, que para espaçamentos menores os níveis de deformação no cabo de fibra óptica serão maiores.

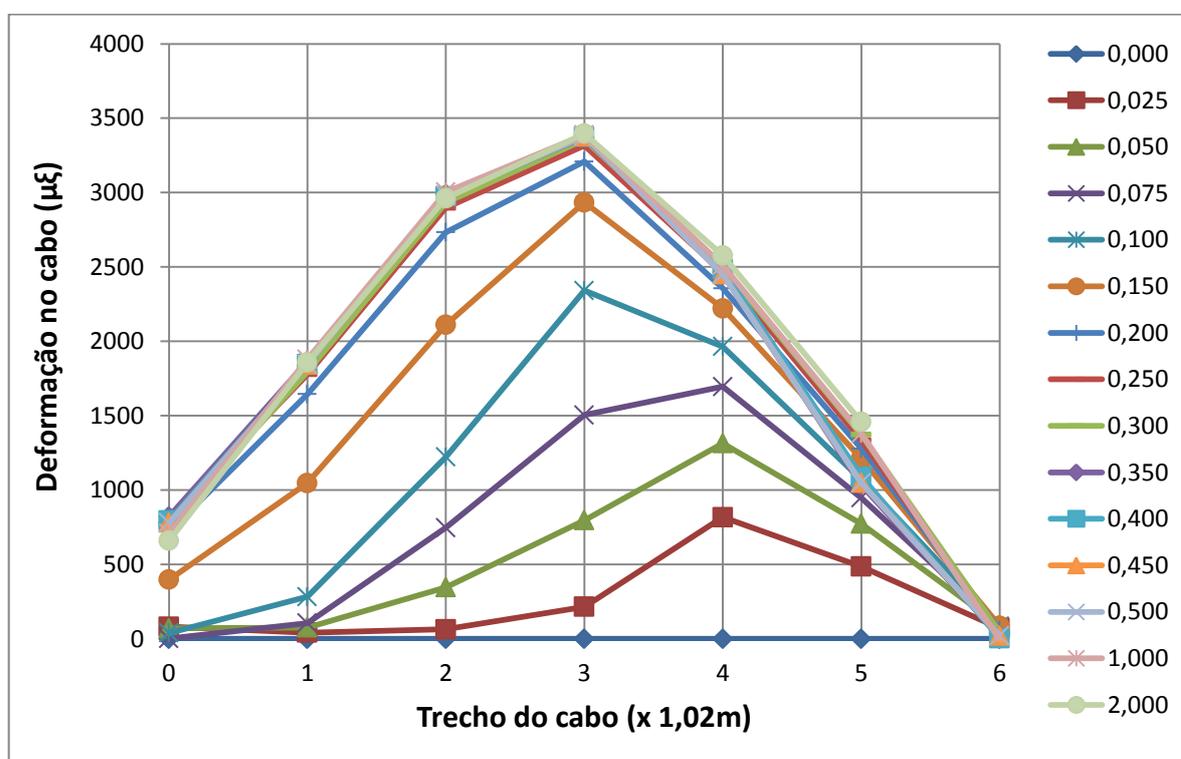


FIGURA 4.22. TRECHO DO CABO VERSUS DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 36 MM A CADA 2,0 M)

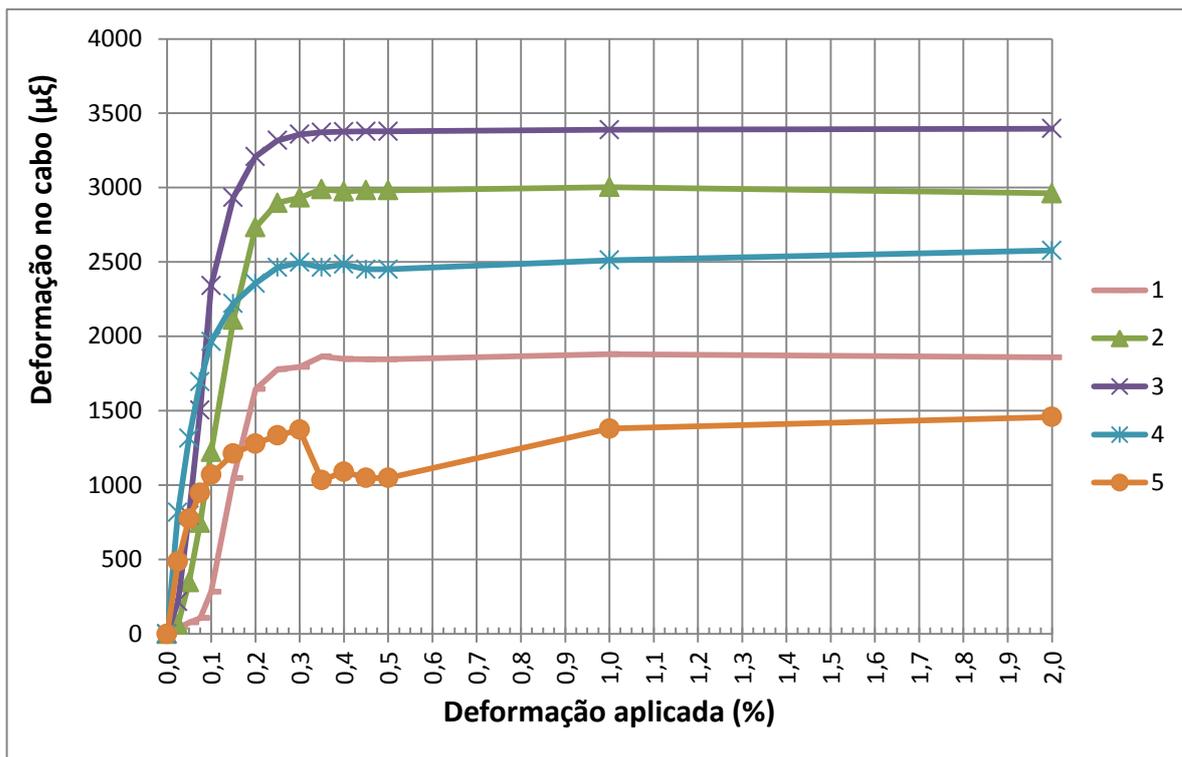


FIGURA 4.23. DEFORMAÇÃO APLICADA VERSUS DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 36 MM A CADA 2,0 M)

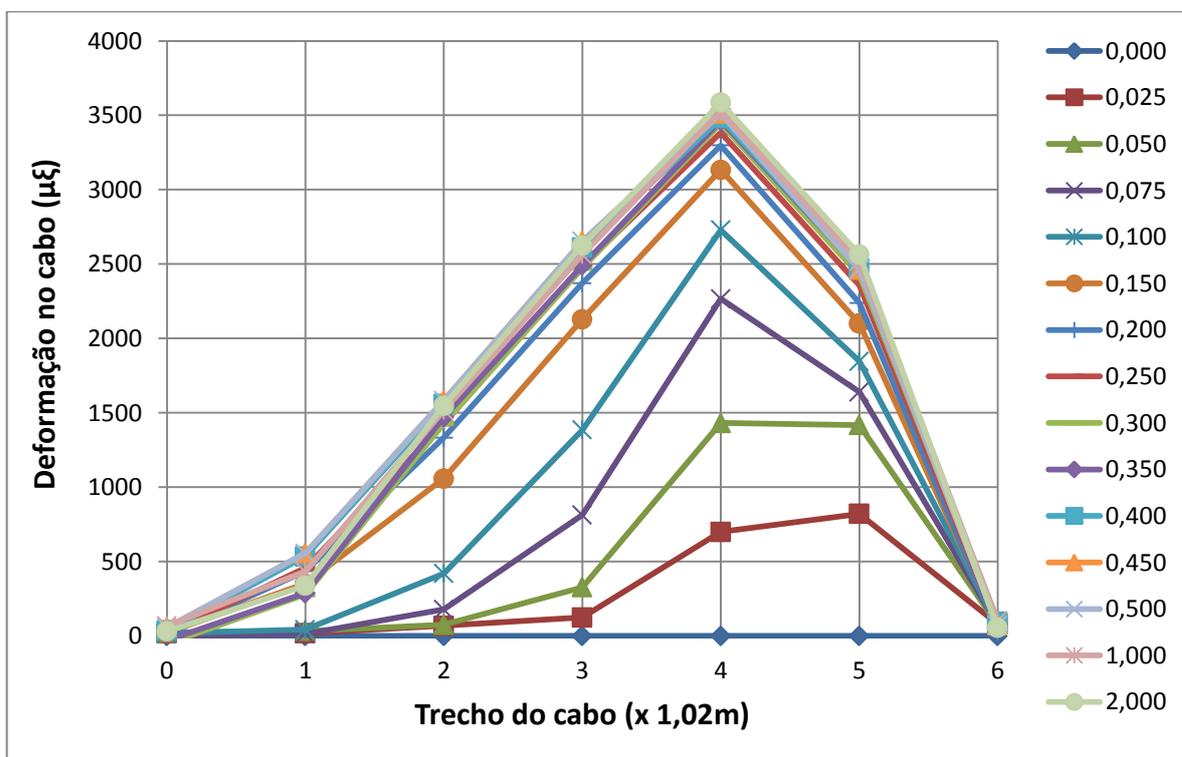


FIGURA 4.24. TRECHO DO CABO VERSUS DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 36 MM A CADA 1,0 M)

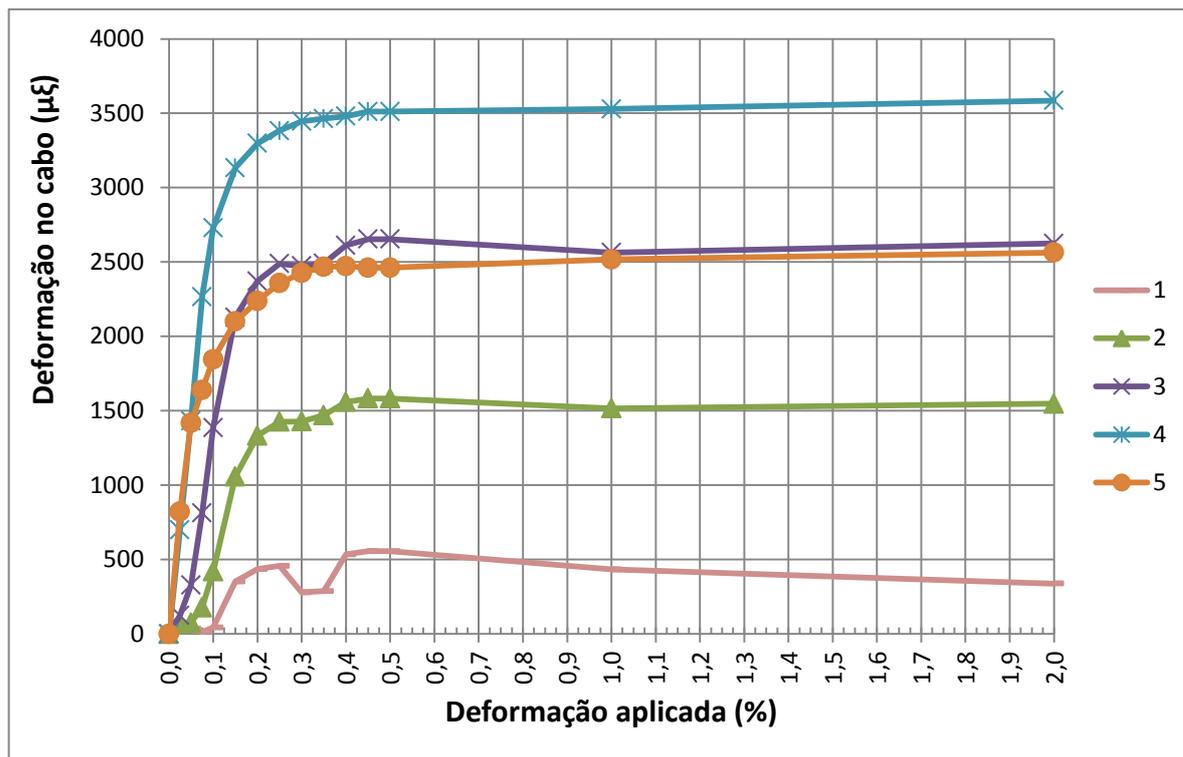


FIGURA 4.25. DEFORMAÇÃO APLICADA *VERSUS* DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 36 MM A CADA 1,0 M)

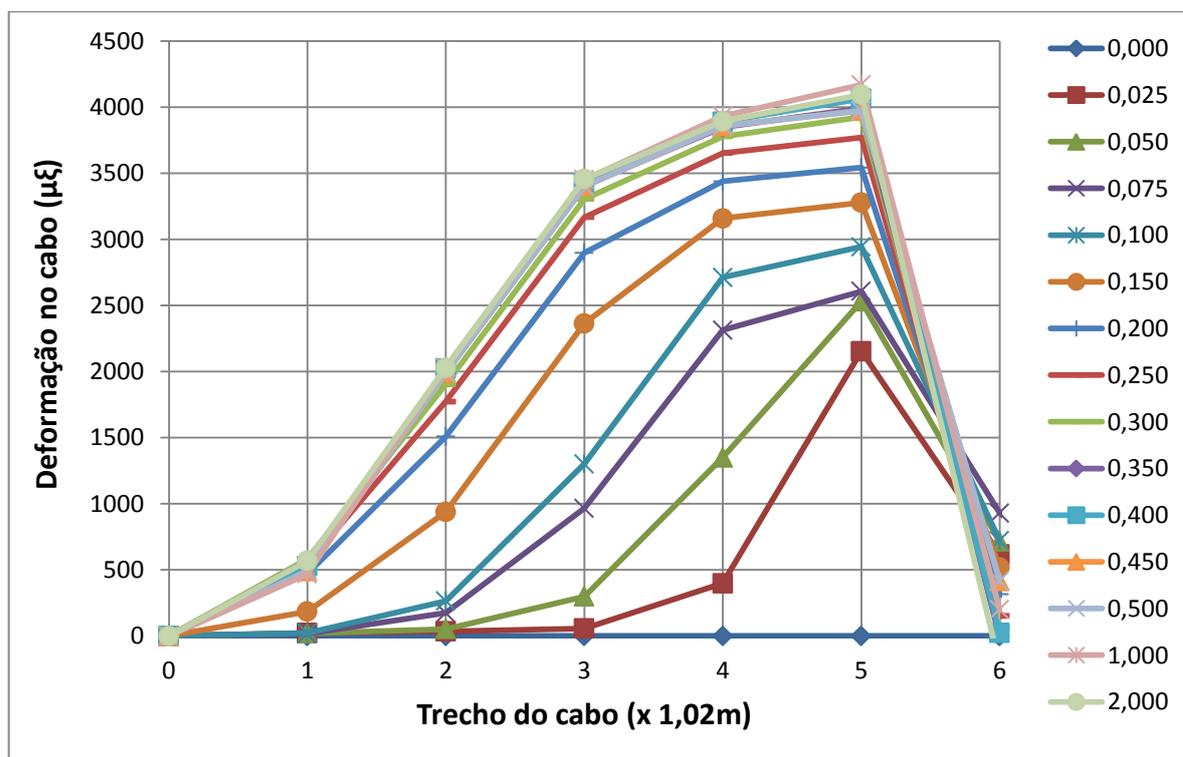


FIGURA 4.26. TRECHO DO CABO *VERSUS* DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 36 MM A CADA 0,5 M)

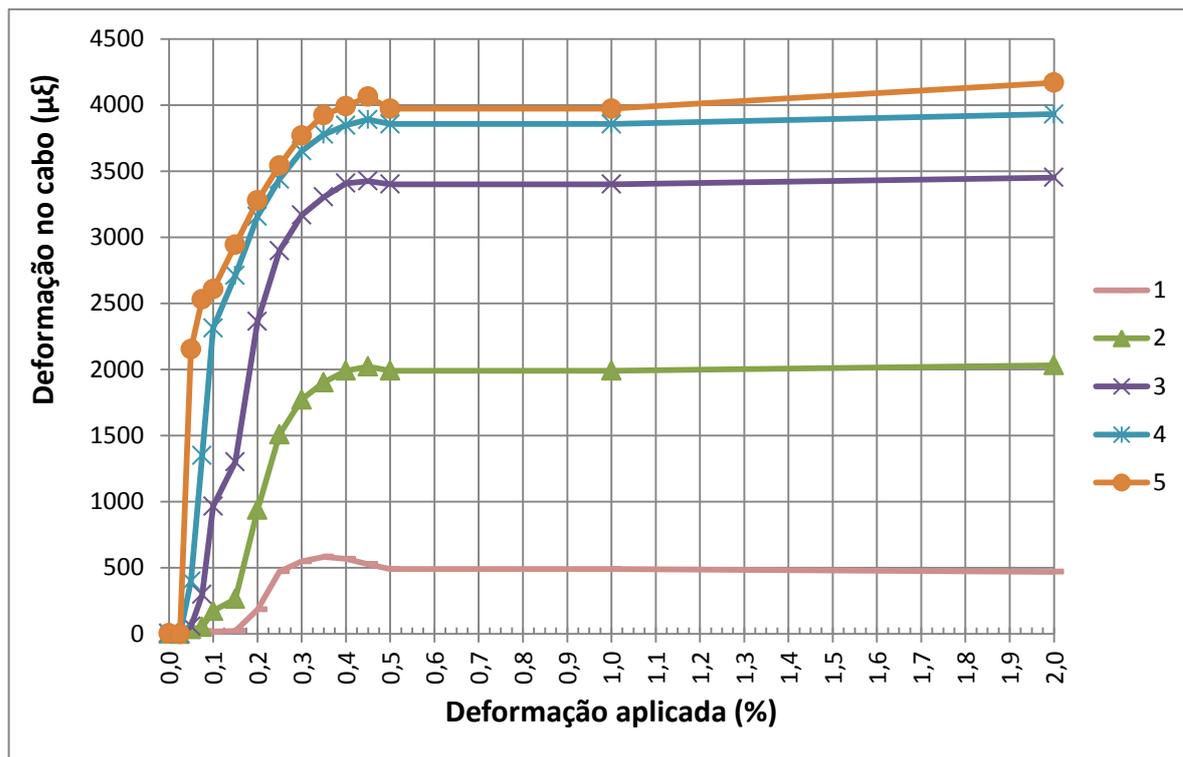


FIGURA 4.27. DEFORMAÇÃO APLICADA VERSUS DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 36 MM A CADA 0,5 M)

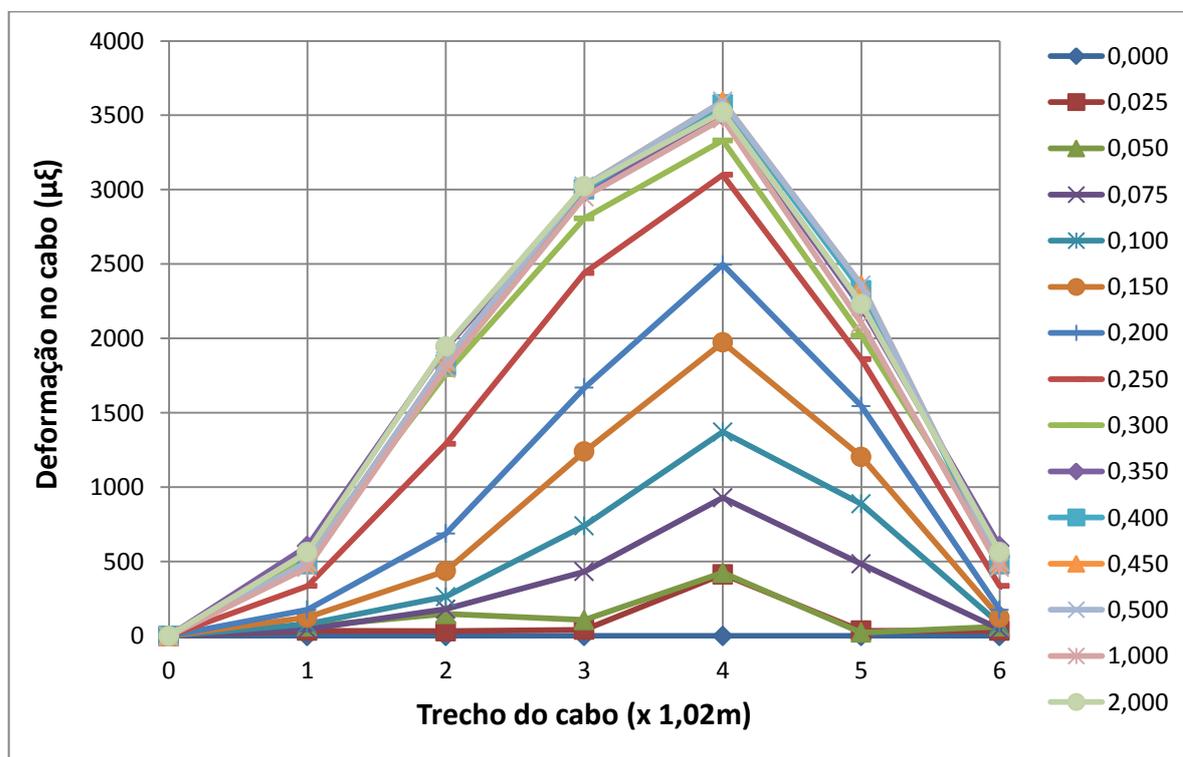


FIGURA 4.28. TRECHO DO CABO VERSUS DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 50 MM A CADA 2,0 M)

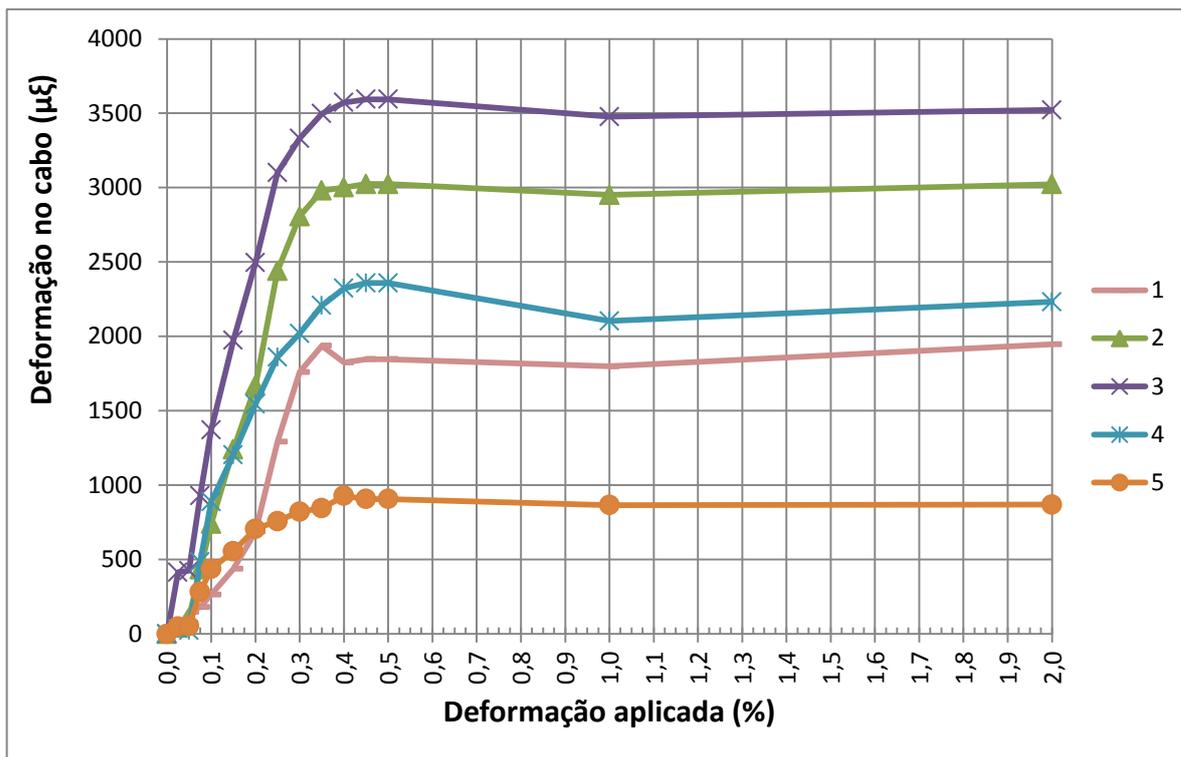


FIGURA 4.29. DEFORMAÇÃO APLICADA VERSUS DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 50 MM A CADA 2,0 M)

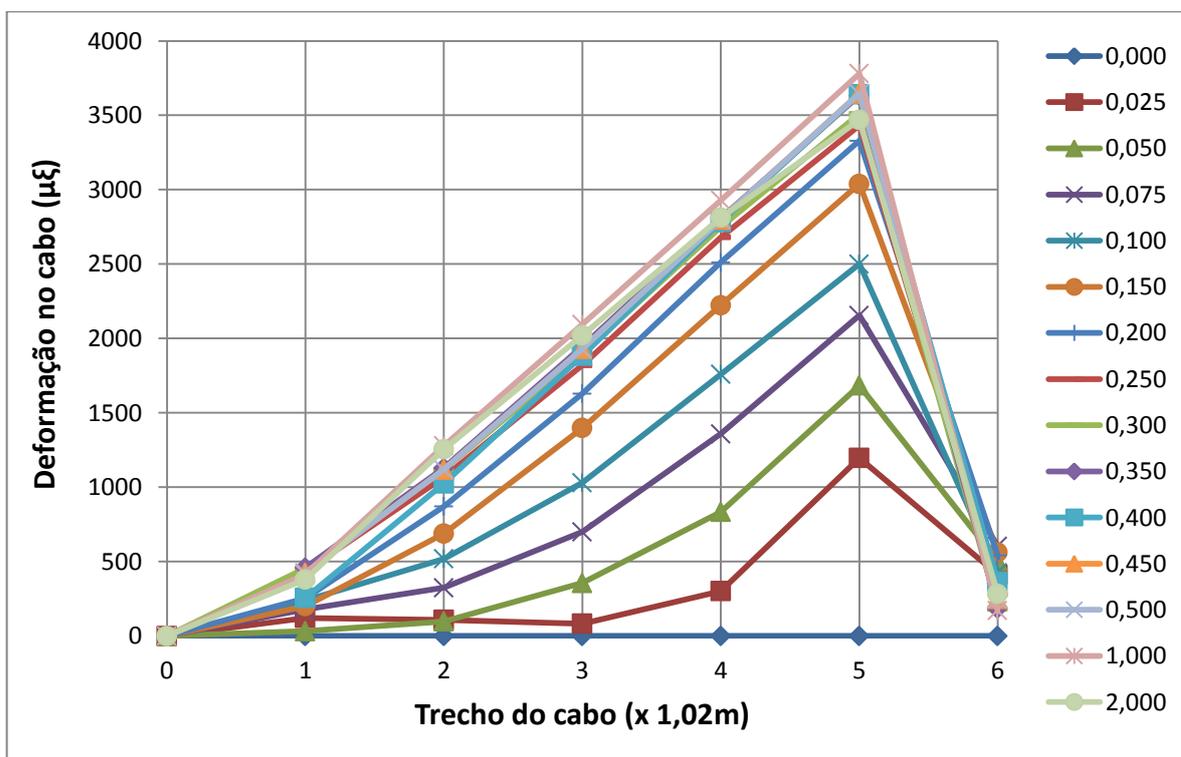


FIGURA 4.30. TRECHO DO CABO VERSUS DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 50 MM A CADA 1,0 M)

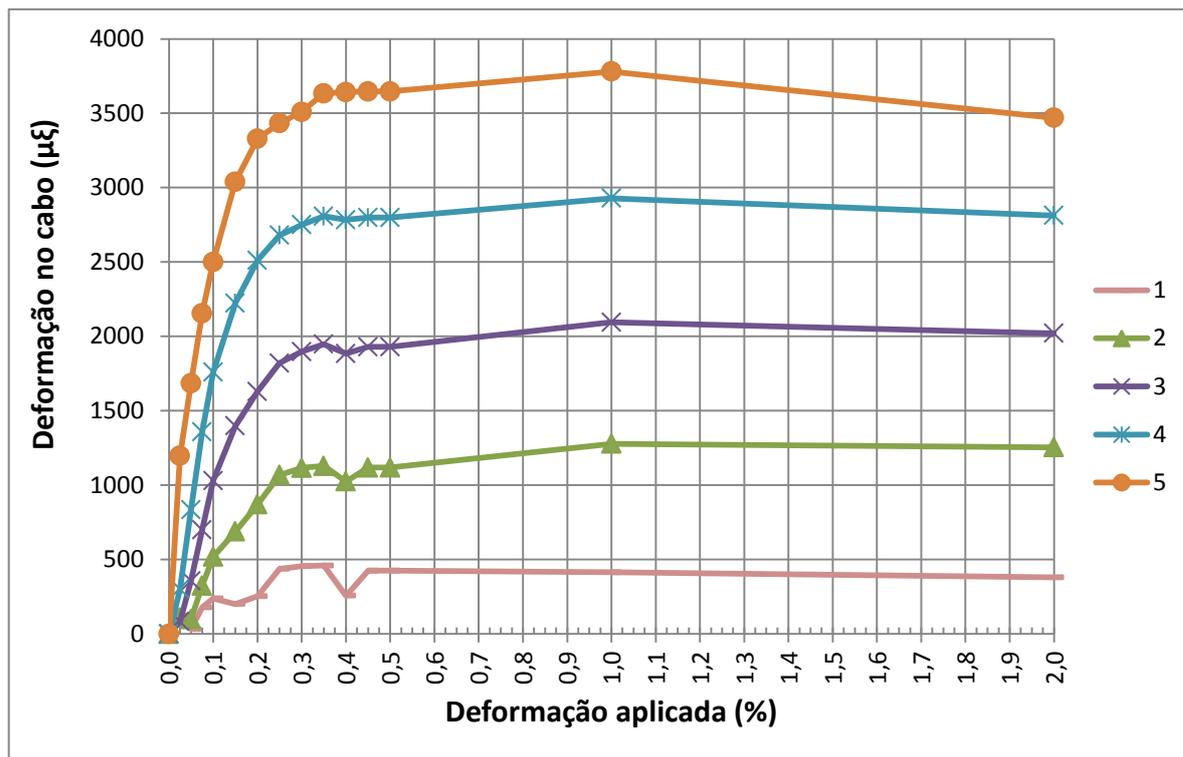


FIGURA 4.31. DEFORMAÇÃO APLICADA *VERSUS* DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 50 MM A CADA 1,0 M)

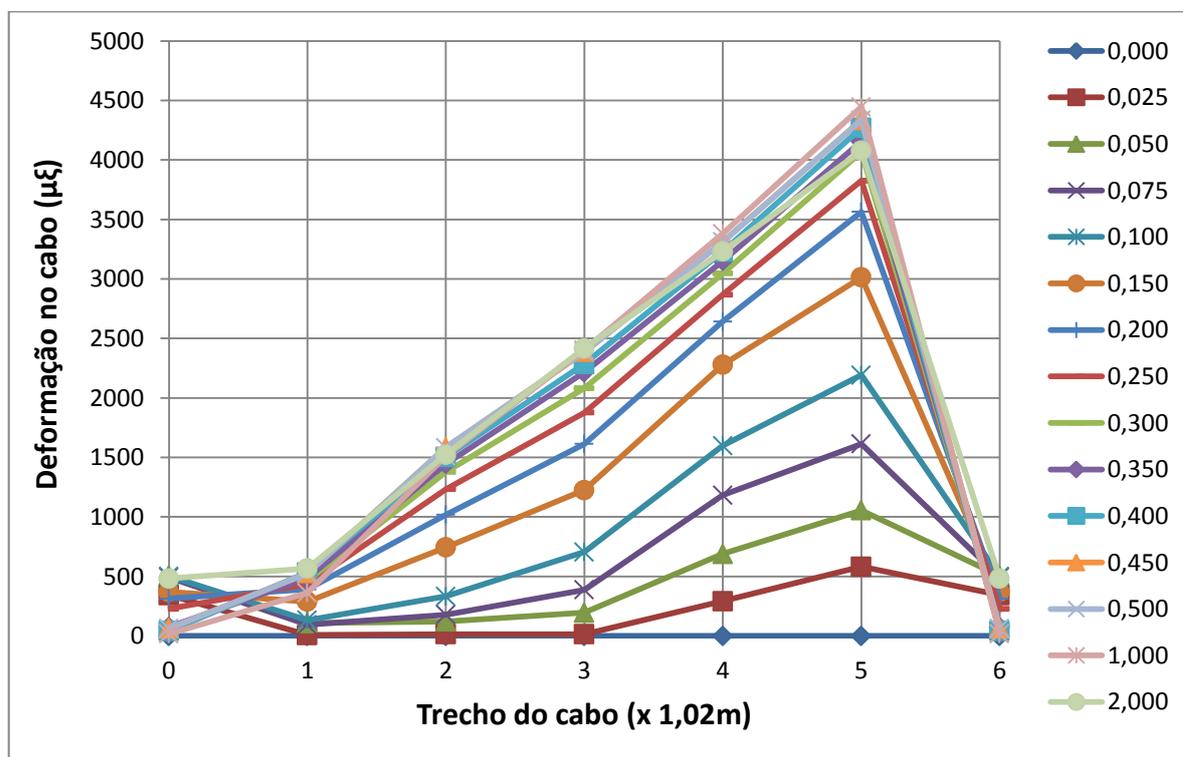


FIGURA 4.32. TRECHO DO CABO *VERSUS* DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 50 MM A CADA 0,5 M)

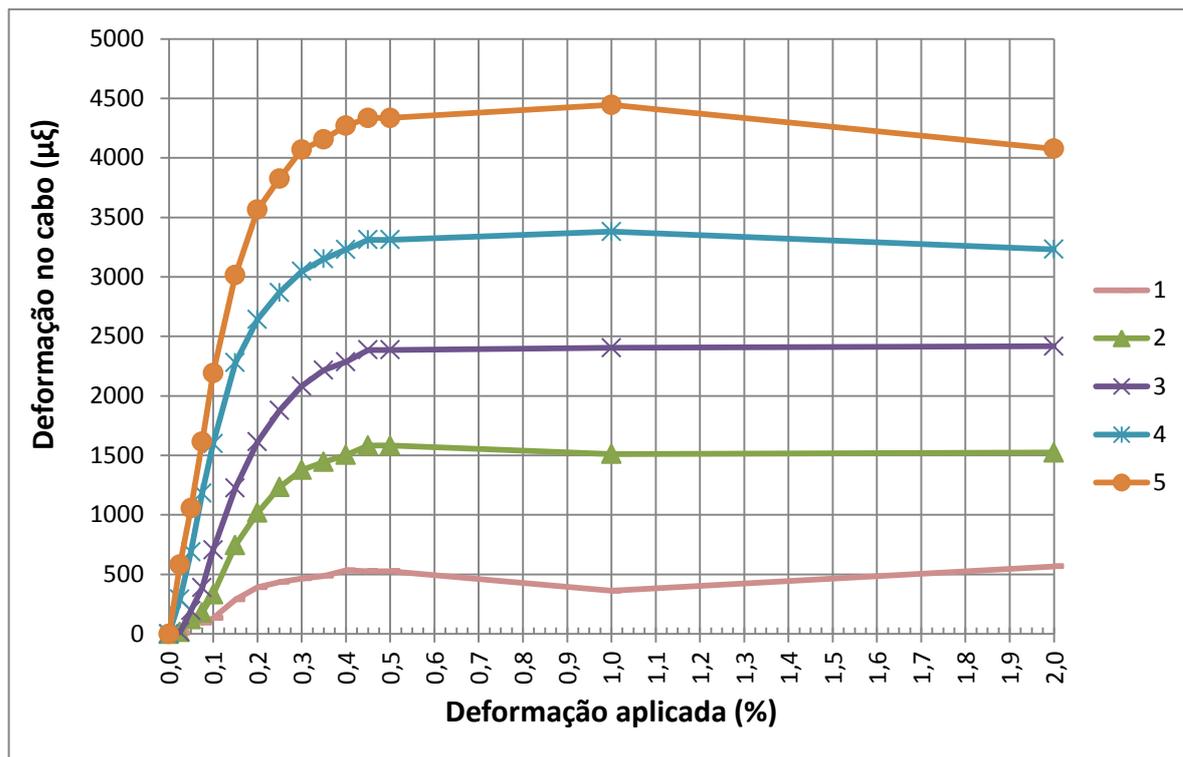


FIGURA 4.33. DEFORMAÇÃO APLICADA *VERSUS* DEFORMAÇÃO NO CABO (EDAF 50 MM A CADA 0,5 M)

4.4.1 Comparação entre os testes de arrancamento

Neste item serão apresentadas comparações entre os resultados obtidos com a utilização dos EDAF em diferentes espaçamentos e tamanhos. Com a comparação dos resultados dos testes de arrancamento realizados com as diferentes combinações citadas foi possível avaliar qual a melhor dimensão e espaçamento dos EDAF para aplicação em campo. Nos gráficos, a deformação aplicada é plotada no eixo horizontal (em %) e a deformação no cabo no eixo vertical (em $\mu\epsilon$).

A Figura 4.34 mostra os resultados dos ensaios com EDAF de 25 mm e do ensaio realizado sem elementos de ancoragem no cabo de fibra óptica.

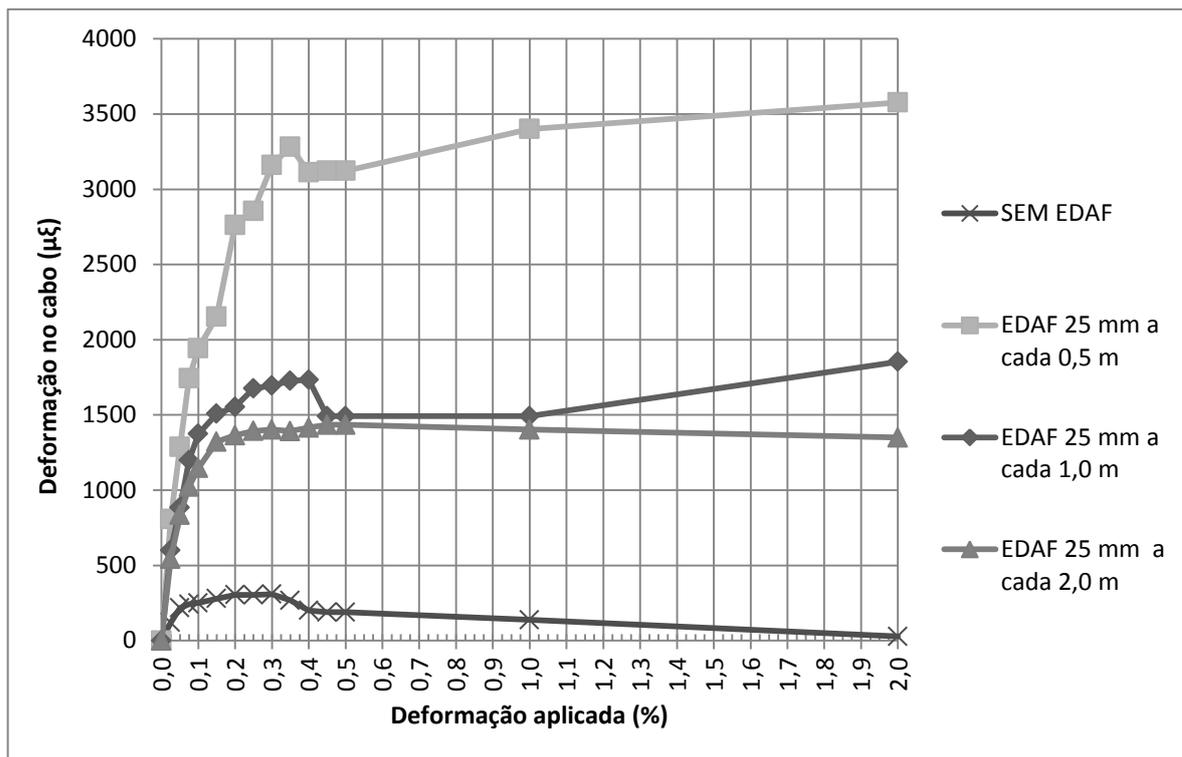


FIGURA 4.34. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS COM EDAF DE 25 MM

A Figura 4.35 mostra os resultados dos ensaios com EDAF de 36 mm e do ensaio realizado sem elementos de ancoragem no cabo de fibra óptica.

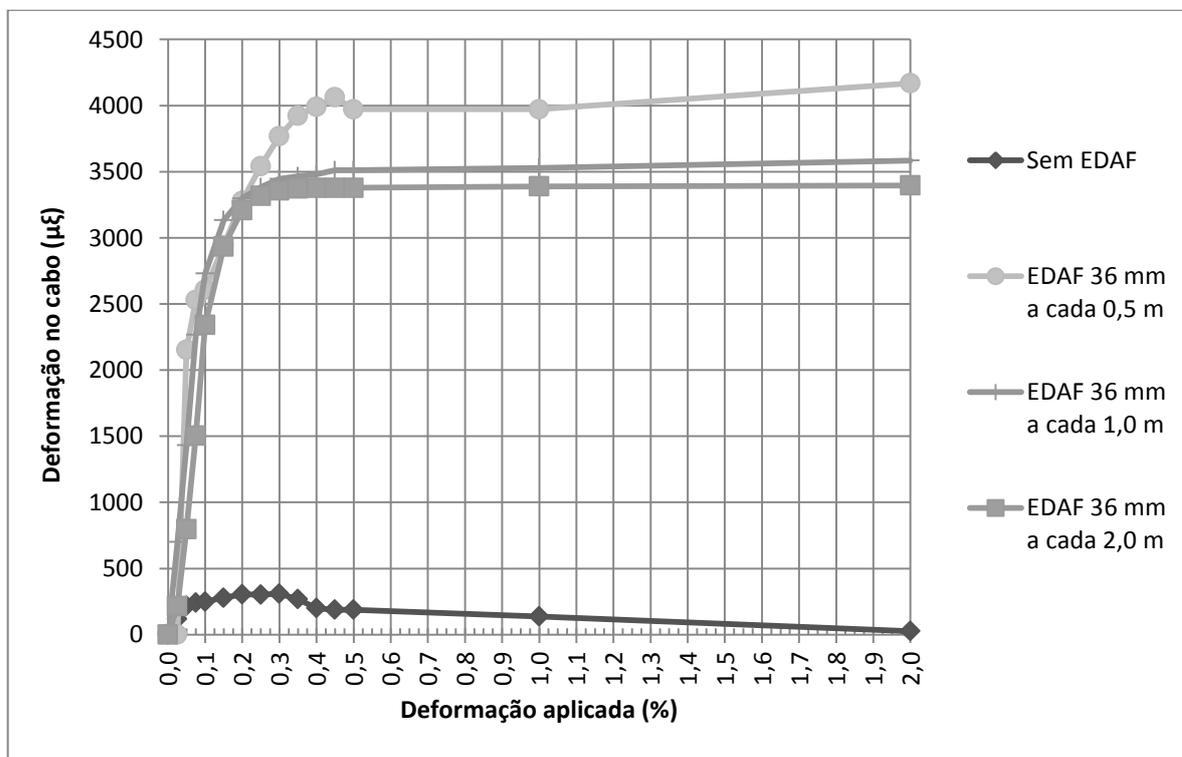


FIGURA 4.35. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS COM EDAF DE 36 MM

A Figura 4.36 mostra os resultados dos ensaios com EDAF de 50 mm e do ensaio realizado sem elementos de ancoragem no cabo de fibra óptica.

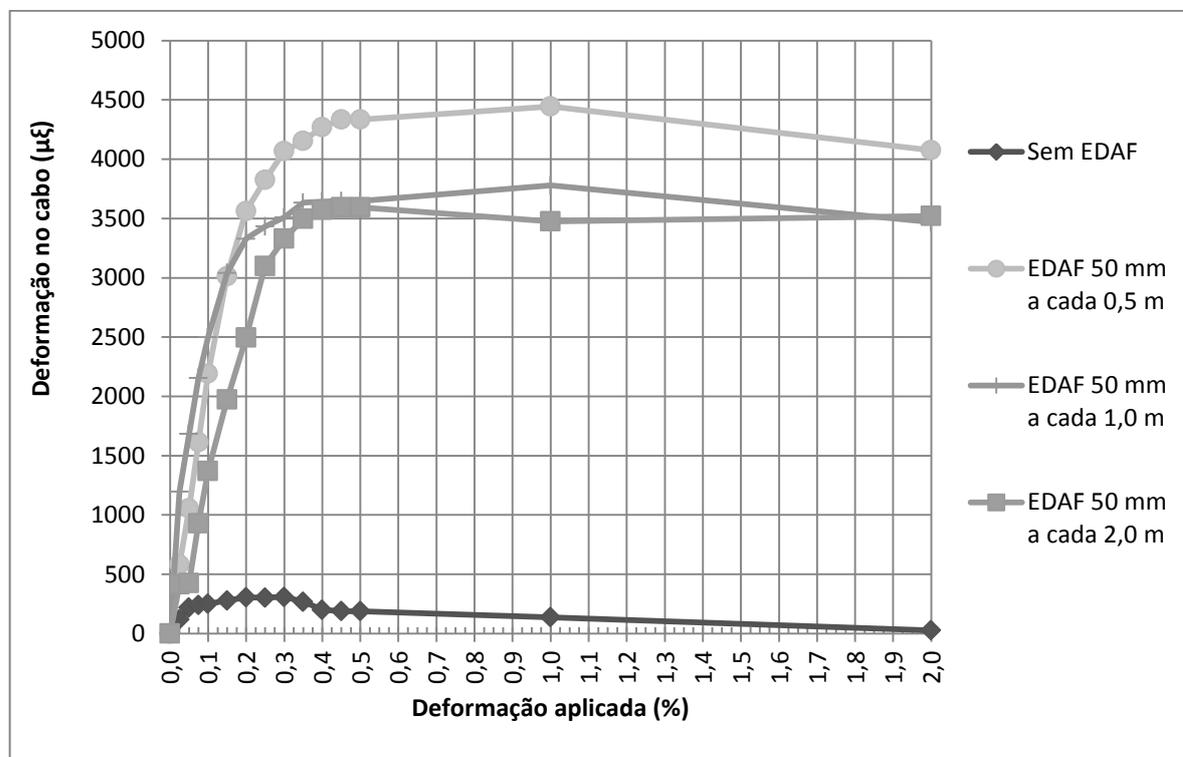


FIGURA 4.36. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS COM EDAF DE 50 MM

A mostra Figura 4.37 os resultados dos ensaios com EDAF espaçadas a cada 2,0 m e do ensaio realizado sem elementos de ancoragem no cabo de fibra óptica.

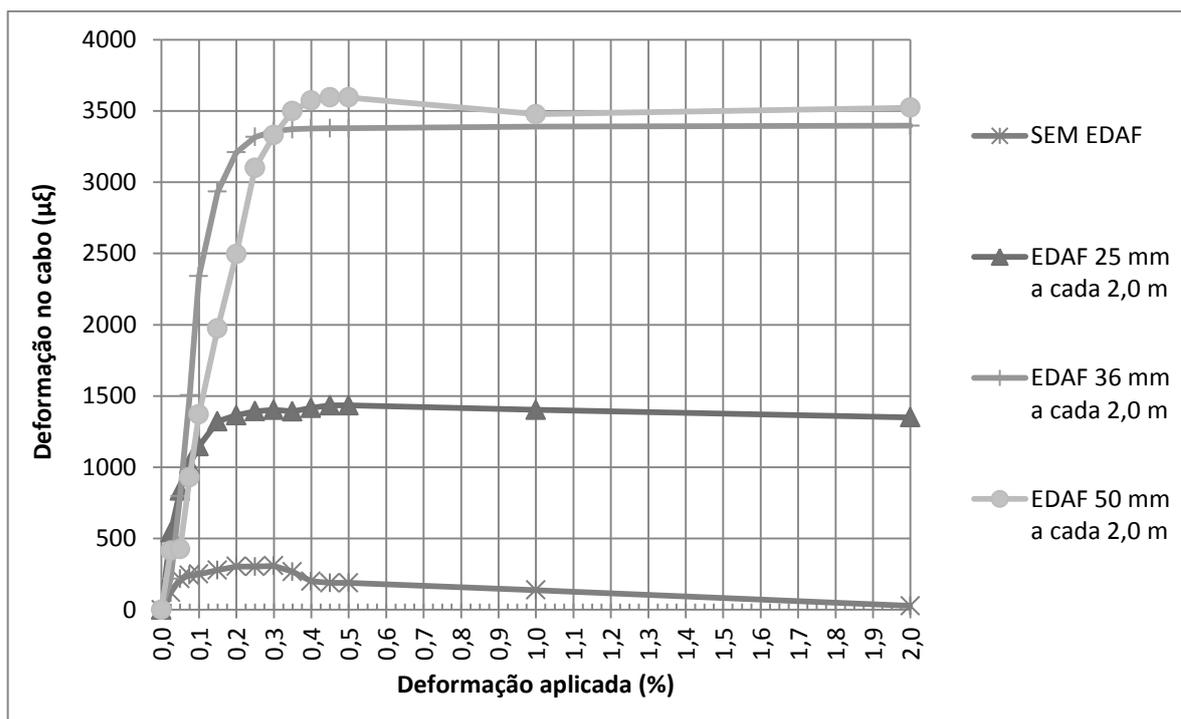


FIGURA 4.37. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS COM EDAF ESPAÇADAS A CADA 2,0 M

A Figura 4.38 mostra os resultados dos ensaios com EDAF espaçadas a cada 1,0 m e do ensaio realizado sem elementos de ancoragem no cabo de fibra óptica.

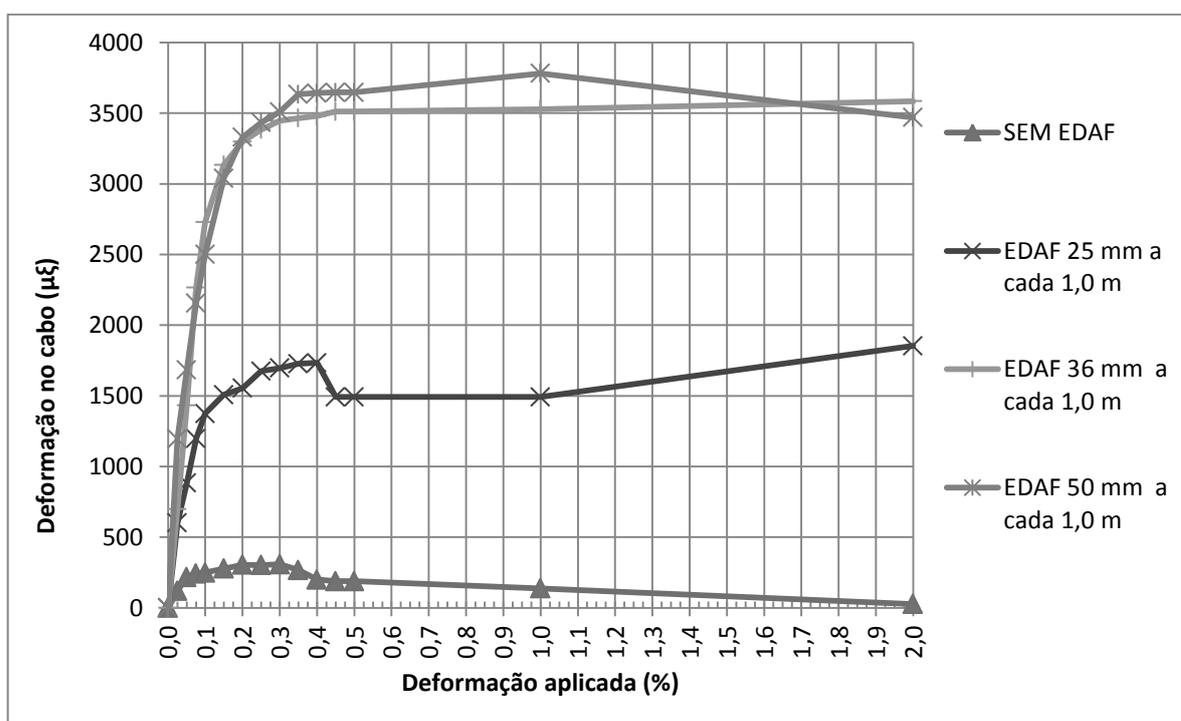


FIGURA 4.38. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS COM EDAF ESPAÇADAS A CADA 1,0 M

A Figura 4.39 mostra os resultados dos ensaios com EDAF espaçadas a cada 0,5 m e do ensaio realizado sem elementos de ancoragem no cabo de fibra óptica.

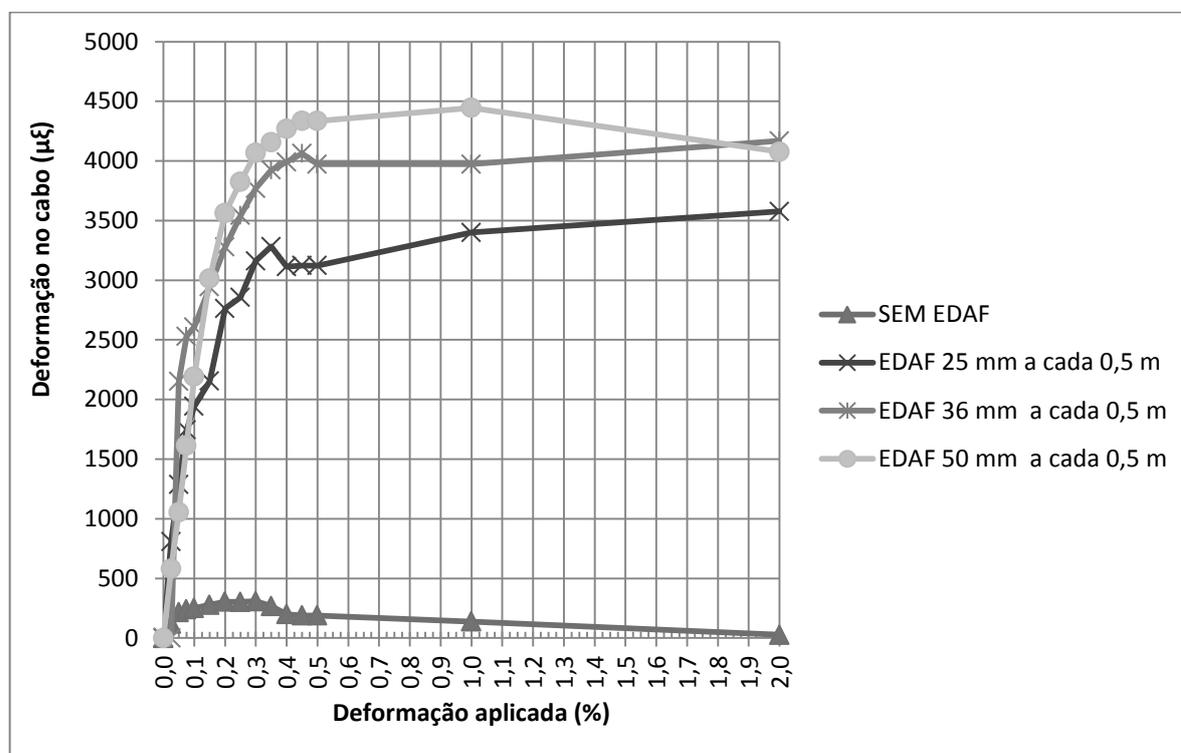


FIGURA 4.39. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS COM EDAF ESPAÇADAS A CADA 0,5 M

É nítido, nos resultados apresentados, que os sistemas de ancoragem amplificam os sinais de deformações registrados pela unidade leitora DTSS. Diante do apresentado, em uma instalação em campo o espaçamento entre as âncoras deve ser avaliado criteriosamente. Também foi observado na instalação dos EDAFs de 36 mm, que dependendo do torque aplicado entre as peças metálicas do EDAF durante a sua instalação no cabo de fibra óptica, perde-se o sinal. Este fato deve-se a pequena área de contato entre a arruela do EDAF de 36 mm e o cabo de fibra óptica, que gerava uma tensão pontual no cabo interrompendo a passagem da luz no interior do núcleo da fibra óptica.

4.5 SIMULAÇÃO DA ZONA DE CISALHAMENTO

Os resultados para simulação da zona de cisalhamento foram analisados avaliando as deformações registradas a cada metro do cabo de fibra óptica que são influenciados pelo teste (trecho do cabo que se encontrava dentro da caixa de cisalhamento). Para os cinco testes realizados sempre foram utilizados o mesmo trecho do cabo de fibra óptica. A configuração dos ensaios é descrita na Tabela 4.5.

TABELA 4.5. CONFIGURAÇÕES DOS ENSAIOS PARA SIMULAÇÃO DA ZONA DE CISALHAMENTO

Ensaio	Configuração
Ensaio 1	Sem utilização dos EDAF.
Ensaio 2	Com EDAF espaçados a cada 1 m no cabo de fibra óptica, sendo que um dos EDAF está localizado na posição central da zona de cisalhamento.
Ensaio 3	Com EDAF espaçados a cada 1 m, sendo que dois dos EDAF estão localizados nas extremidades da zona de cisalhamento.
Ensaio 4	Com EDAF espaçados a cada 2 m no cabo de fibra óptica, sendo que um dos EDAF está localizado na posição central da zona de cisalhamento.
Ensaio 5	Com EDAF espaçados a cada 2 m, sendo que não há EDAF localizado na zona de cisalhamento.

Os resultados gráficos a seguir, dos cinco testes realizados, mostram a evolução das deformações registradas no cabo no eixo vertical, a posição do cabo no eixo horizontal e cada linha representa uma leitura registrada na unidade leitora no intervalo de tempo 2 minutos que corresponde ao deslocamento de 0,8 cm, aplicado na parte móvel da caixa de cisalhamento. Nota-se que são mostrados valores de comprimento do cabo do ponto 500 ao ponto 508, entretanto estes dois pontos estão fora do trecho influenciado diretamente pelo ensaio. O trecho do cabo que foi influenciado pelo ensaio, que se encontrava dentro do comprimento total da

caixa de cisalhamento de 6,10 m, deve ser considerado do ponto 501 ao 507. Estes pontos são localizados anteriormente ao preenchido do solo na caixa, no pré-tensionamento do cabo, conforme citado no capítulo anterior (item 3.2.3). Subtraindo 507 de 501 e multiplicando este resultado por 1,02, tem-se o comprimento do cabo igual a 6,12 m (valor aproximado do comprimento total da caixa de cisalhamento).

A Figura 4.40 a seguir mostra uma fotografia da configuração do Ensaio 1, sem a utilização dos EDAF, no momento em que o cabo já se encontrava disposto e pré-tensionado e o solo era preenchido através do método da chuva de areia. Neste ensaio não foram instalados os EDAF no cabo de fibra óptica, conforme já citado.



FIGURA 4.40. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO 1

O gráfico apresentado na Figura 4.41, refere-se aos resultados do Ensaio 1. Neste gráfico é mostrado abaixo da legenda do eixo horizontal uma ilustração da

configuração do ensaio e a posição aproximada da caixa de cisalhamento em relação ao trecho do cabo influenciado pelo ensaio.

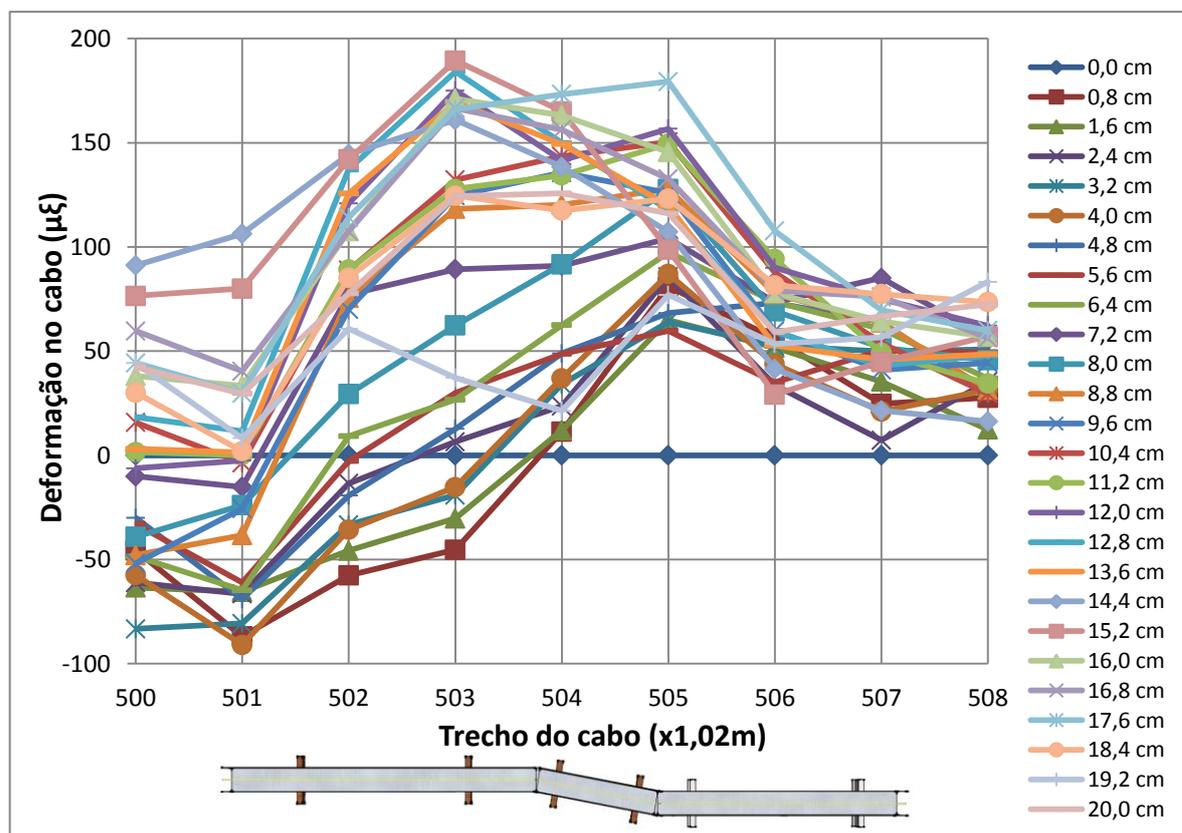


FIGURA 4.41. ZONA DE CISALHAMENTO – SEM EDAF – ENSAIO 1

Os resultados gerados no primeiro ensaio são de difícil interpretação e não seguem um comportamento linear. Os valores negativos apresentados no gráfico da Figura 4.41, indicam que o cabo sofreu compressão, considerando a sua condição inicial de pré-tensionamento. Este fato se deve à força de atrito existente entre o cabo de fibra óptica e solo que foi superada já no início do deslocamento da parte móvel da caixa de cisalhamento, fazendo com que o cabo volta-se ao seu estado inicial, anterior ao pré-tensionamento (os valores positivos no gráfico indicam tração no cabo). Neste teste não foi possível identificar onde está localizada a zona de

transição entre à zona estável e a área de movimento, objetivo principal desta pesquisa.

A Figura 4.42 a seguir mostra a configuração do Ensaio 2, com a utilização dos EDAF de 50 mm espaçados a cada 1 m, no momento em que o cabo já se encontrava disposto e pré-tensionado e o solo era preenchido através do método da chuva de areia. Neste ensaio os EDAF foram instalados no cabo de fibra óptica a cada 1 m ao longo de seu comprimento, sendo que um dos EDAF está localizado no comprimento central da zona de cisalhamento (configuração ilustrada na Figura 3.26).

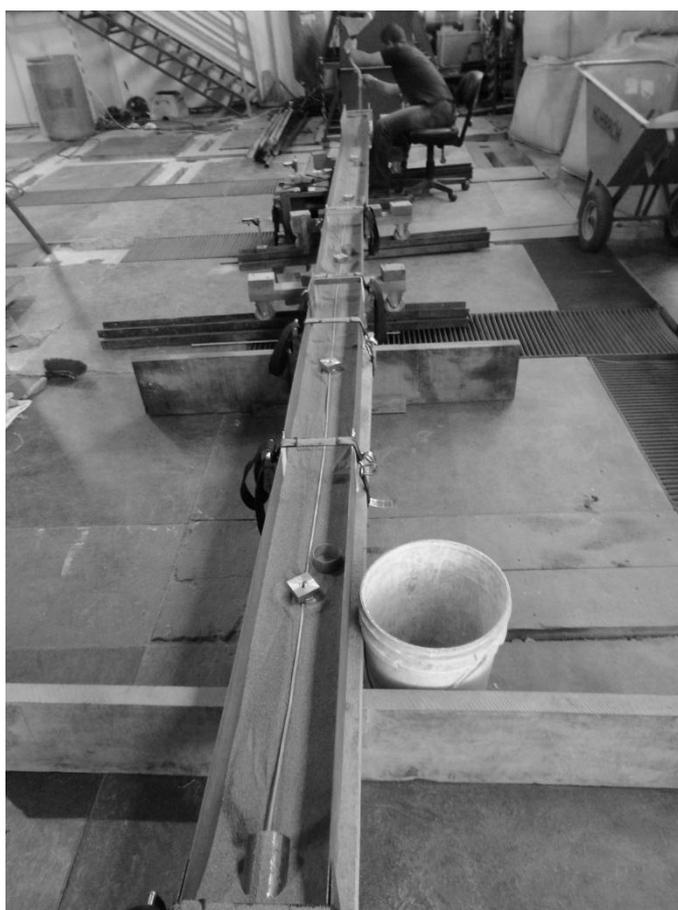


FIGURA 4.42. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO 2

O gráfico apresentado na Figura 4.43 refere-se aos resultados do Ensaio 2. Neste gráfico é mostrado abaixo da legenda do eixo horizontal uma ilustração da

configuração do ensaio e a posição aproximada da caixa de cisalhamento em relação ao trecho do cabo influenciado pelo ensaio.

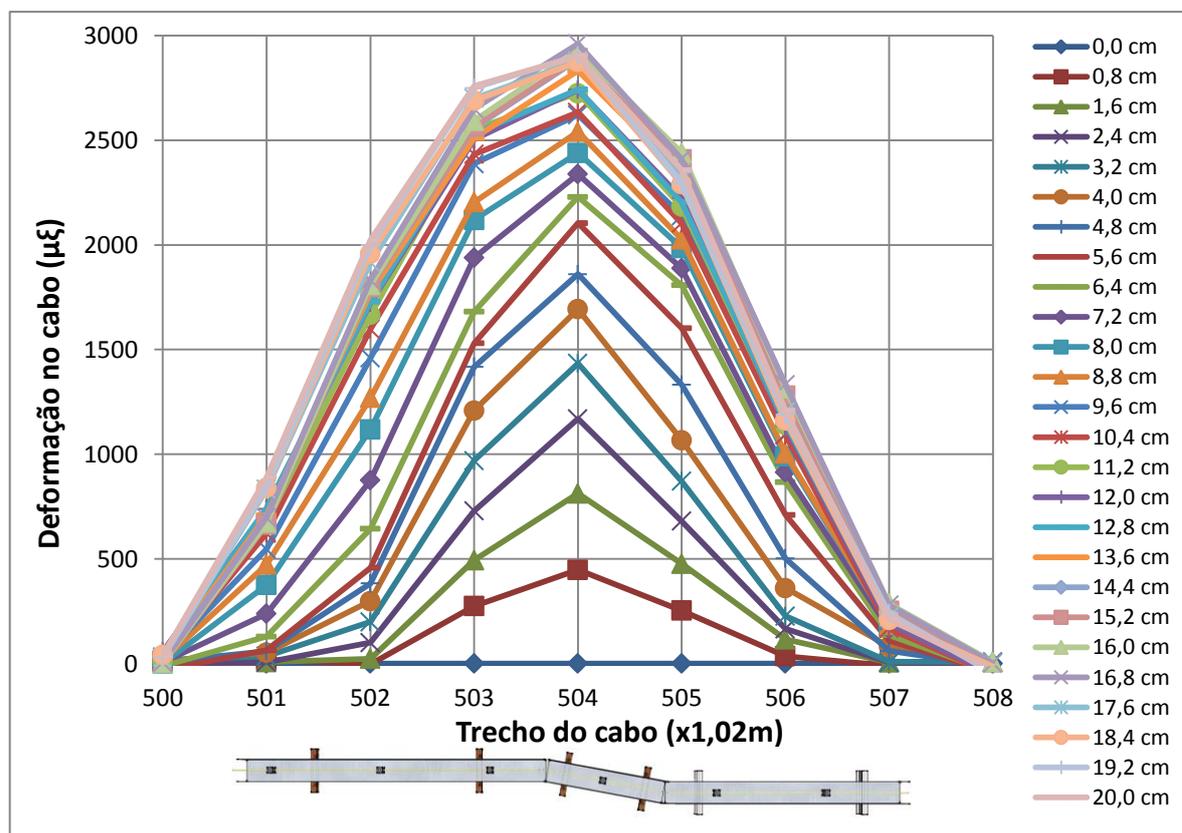


FIGURA 4.43. ZONA DE CISALHAMENTO – EDAF 50 MM A CADA 1 M – ENSAIO 2

Os resultados gerados no segundo ensaio mostram que há uma tendência na evolução das deformações registradas no cabo de fibra óptica ao longo do ensaio. Nota-se que as maiores deformações são concentradas no ponto 504 do gráfico da Figura 4.43, onde está localizada a zona transição entre a massa de solo estável e a massa de solo em movimento, indicando a eficiência do sensor distribuído de fibra óptica em conjunto com os sistemas de ancoragem desenvolvidos.

A Figura 4.44 a seguir mostra a configuração do Ensaio 3, com a utilização dos EDAF de 50 mm espaçados a cada 1 m, no momento em que o cabo já se

encontrava disposto e pré-tensionado. Neste ensaio os EDAF foram instalados no cabo de fibra óptica a cada 1 m ao longo de seu comprimento, sendo que dois dos EDAF estavam localizados nas extremidades da zona de cisalhamento (configuração ilustrada na Figura 3.26).

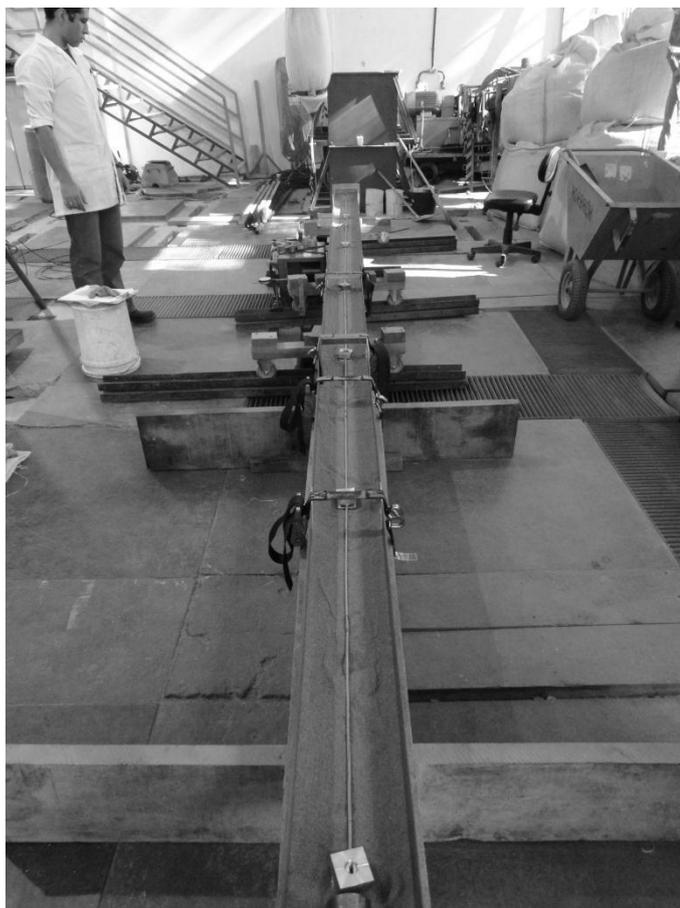


FIGURA 4.44. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO 3

O gráfico apresentado na Figura 4.45 refere-se aos resultados do Ensaio 3. Neste gráfico é mostrado abaixo da legenda do eixo horizontal uma ilustração da configuração do ensaio e a posição aproximada da caixa de cisalhamento em relação ao trecho do cabo influenciado pelo ensaio.

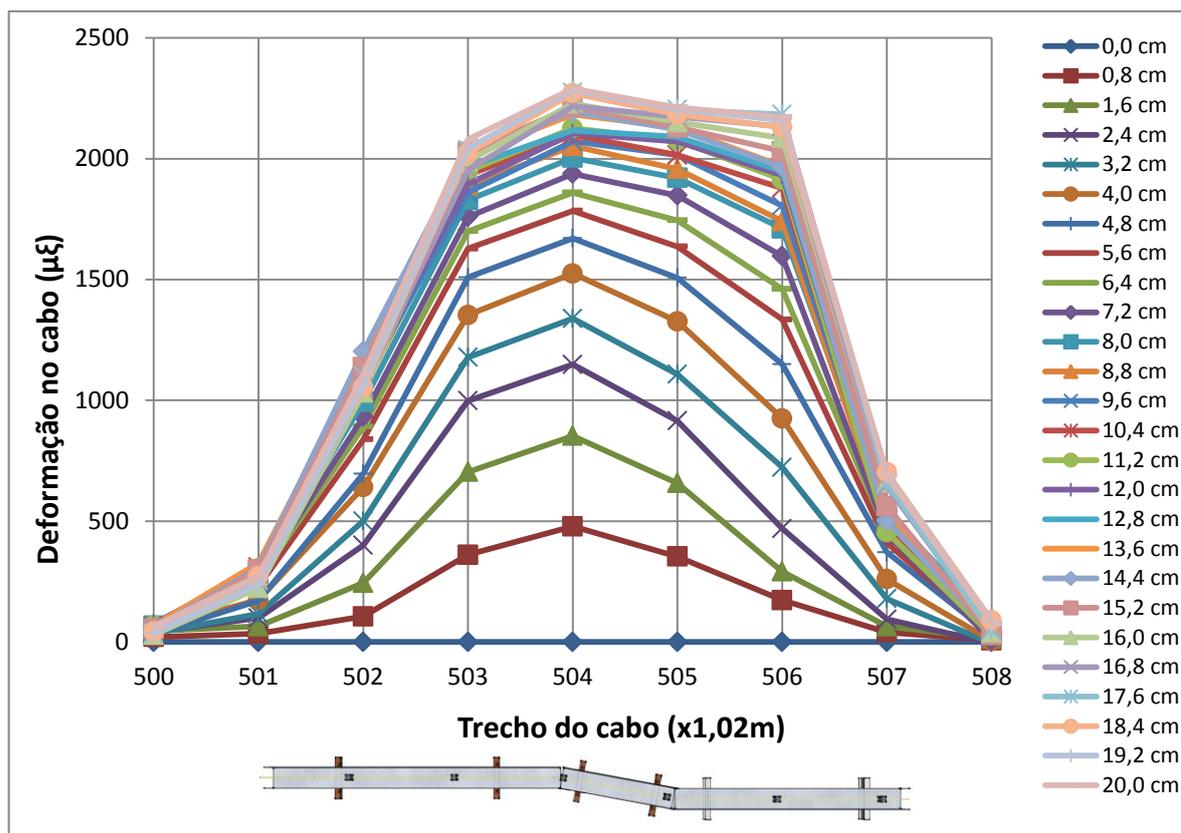


FIGURA 4.45. ZONA DE CISALHAMENTO – EDAF 50 MM A CADA 1 M – ENSAIO 3

Os resultados do terceiro ensaio também mostraram uma tendência na evolução das deformações registradas no cabo de fibra óptica ao longo do ensaio. As maiores deformações são novamente concentradas no ponto 504 do gráfico da Figura 4.45, onde está localizada a zona transição entre a massa de solo estável e a massa de solo em movimento. Comparando as deformações do ponto 506 entre o Ensaio 2 e o Ensaio 3, percebe-se que as deformações registradas neste ponto no Ensaio 3 são maiores. Este fato deve-se provavelmente a posição do EDAF no Ensaio 3 que está localizada na extremidade direita da caixa de cisalhamento (Figura 4.46).

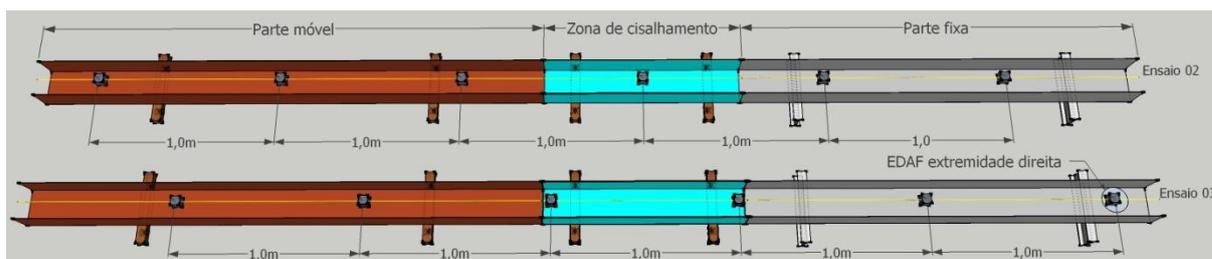


FIGURA 4.46. POSIÇÃO DO EDAF NO ENSAIO 3

A Figura 4.47 a seguir mostra a configuração do Ensaio 4, com a utilização dos EDAF de 50 mm espaçados a cada 2 m, no momento em que o cabo já se encontrava disposto e pré-tensionado. Neste ensaio os EDAF foram instalados no cabo de fibra óptica a cada 2 m ao longo de seu comprimento, sendo que um dos EDAF está localizado no comprimento central da zona de cisalhamento (configuração ilustrada na Figura 3.26).

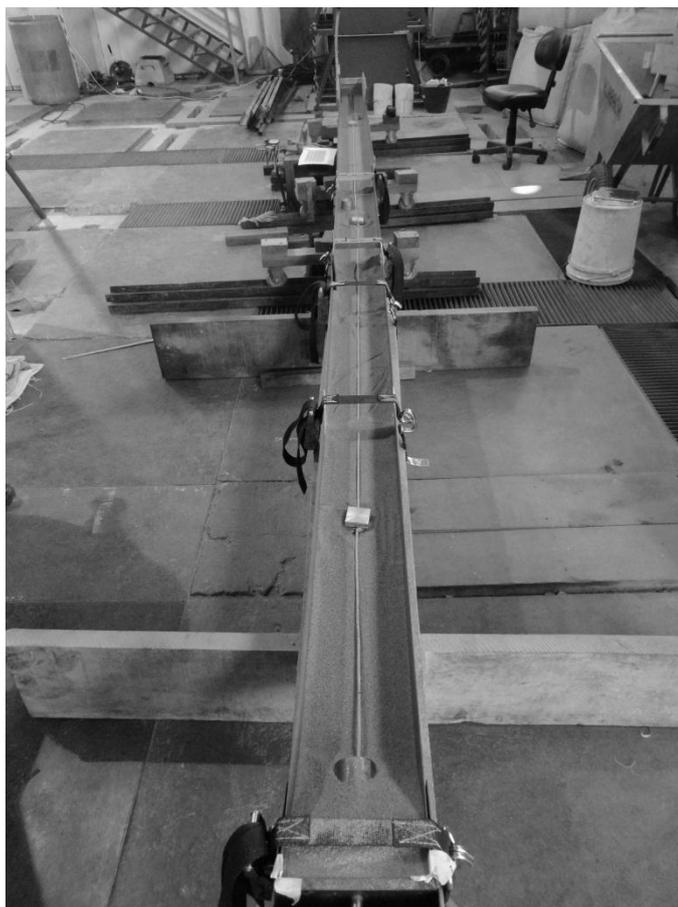


FIGURA 4.47. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO 4

O gráfico apresentado na Figura 4.48 refere-se aos resultados do Ensaio 4. Neste gráfico é mostrado abaixo da legenda do eixo horizontal uma ilustração da configuração do ensaio e a posição aproximada da caixa de cisalhamento em relação ao trecho do cabo influenciado pelo ensaio.

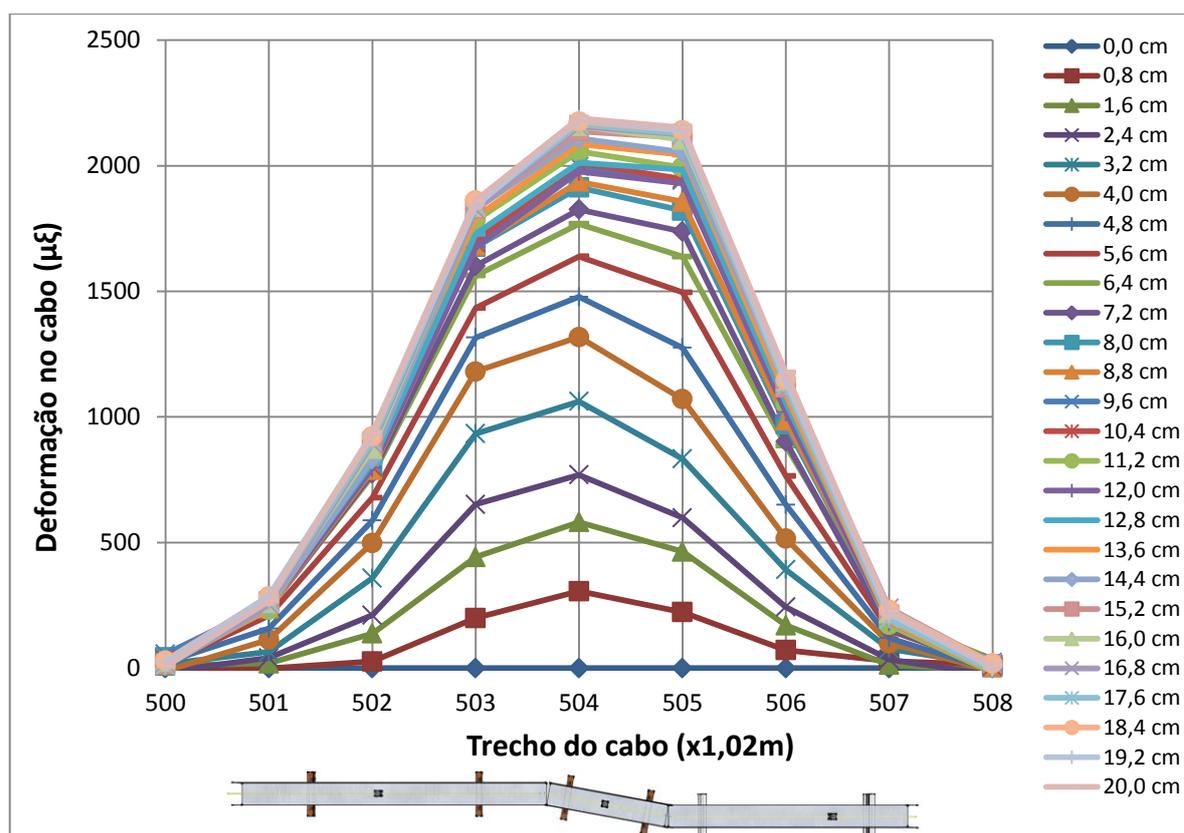


FIGURA 4.48. ZONA DE CISALHAMENTO – EDAF 50 MM A CADA 2 M – ENSAIO 4

Os resultados do quarto ensaio também mostraram uma tendência na evolução das deformações registradas no cabo de fibra óptica ao longo do ensaio. As maiores deformações são novamente concentradas no ponto 504 do gráfico da Figura 4.48, onde está localizada a zona transição entre a massa de solo estável e a massa de solo em movimento. A principal diferença neste resultado é o nível de deformação registrado ao longo do ensaio, que quando comparados com os Ensaio 2 e 3, são menores. Este comportamento deve-se ao espaçamento dos EDAF no ensaio.

A Figura 4.49 a seguir mostra a configuração do Ensaio 5, com a utilização dos EDAF de 50 mm espaçados a cada 2 m, no momento em que o cabo já se encontrava disposto e pré-tensionado e o solo era preenchido através do método da chuva de areia. Neste ensaio os EDAF foram instalados no cabo de fibra óptica a cada 2 m ao longo de seu comprimento, sendo que dois dos EDAF estão localizados a 1 m, à direita e à esquerda, da parte central da zona de cisalhamento (distância de 2 m entre EDAF) (configuração ilustrada na Figura 3.26).



FIGURA 4.49. CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO 5

O gráfico apresentado na Figura 4.50 refere-se aos resultados do Ensaio 5. Neste gráfico é mostrado abaixo da legenda do eixo horizontal uma ilustração da configuração do ensaio e a posição aproximada da caixa de cisalhamento em relação ao trecho do cabo influenciado pelo ensaio.

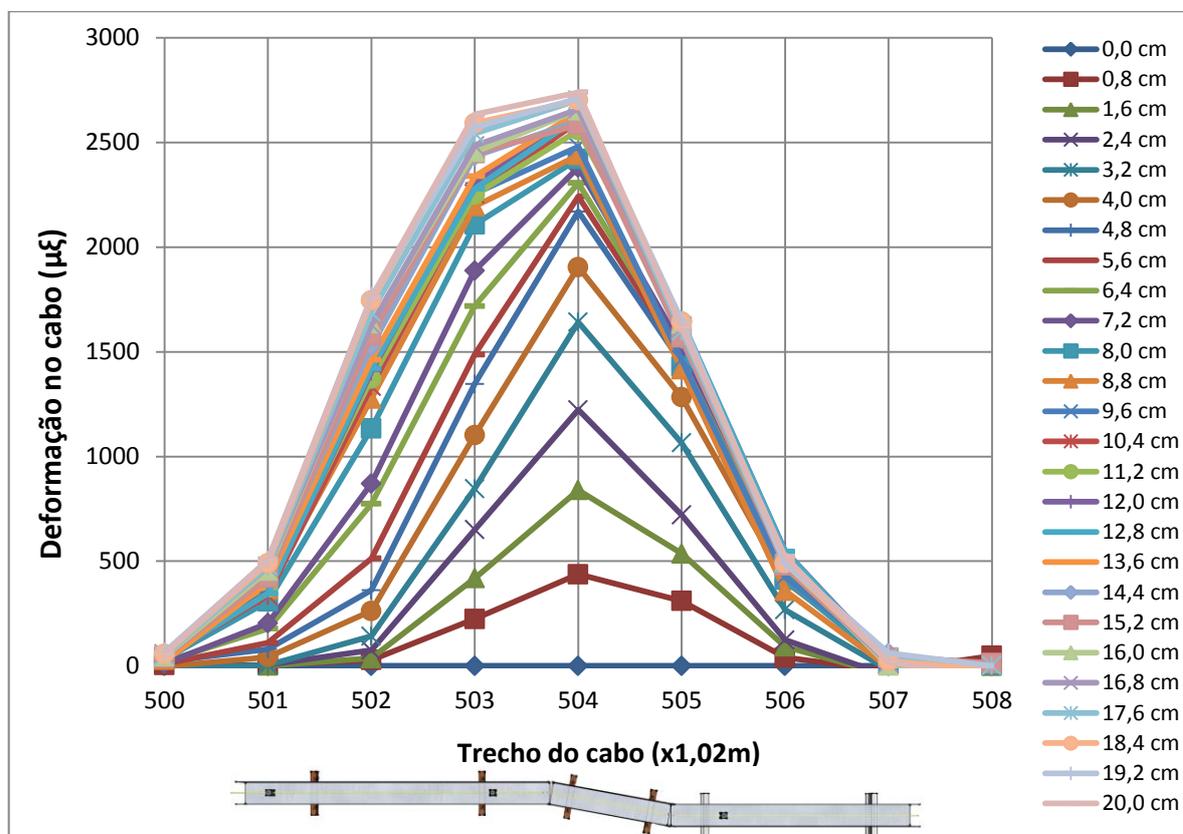


FIGURA 4.50. ZONA DE CISCALHAMENTO – EDAF 50 MM A CADA 2 M – ENSAIO 5

Os resultados do quinto ensaio também mostraram uma tendência na evolução das deformações registradas no cabo de fibra óptica ao longo do ensaio. As maiores deformações são novamente concentradas no ponto 504 do gráfico da Figura 4.50, onde está localizada a zona de transição entre a massa de solo estável e a massa de solo em movimento. Percebe-se que praticamente não são registradas deformações no ponto 507, pois nas proximidades deste trecho do cabo não haviam EDAF instaladas no cabo de fibra óptica.

4.5.1 Comparação entre os resultados para simulação da zona de cisalhamento

Neste item serão apresentadas comparações entre os resultados obtidos com a utilização dos EDAF em diferentes posições e espaçamentos nos testes para simulação da zona de cisalhamento.

As comparações entre os ensaios serão apresentadas graficamente, onde no eixo horizontal são mostradas as deformações no cabo em $\mu\epsilon$ e no eixo vertical o trecho do cabo. O gráfico da Figura 4.51 mostra as deformações registradas no cabo de fibra óptica para cada ensaio nos primeiros 2 minutos de ensaios, quando a deformação da parte móvel da caixa de cisalhamento estava deslocada em 0,8 cm da sua posição inicial. Salienta-se que as deformações apresentadas são equivalentes a média neste intervalo de tempo e não ao tempo final de 2 minutos.

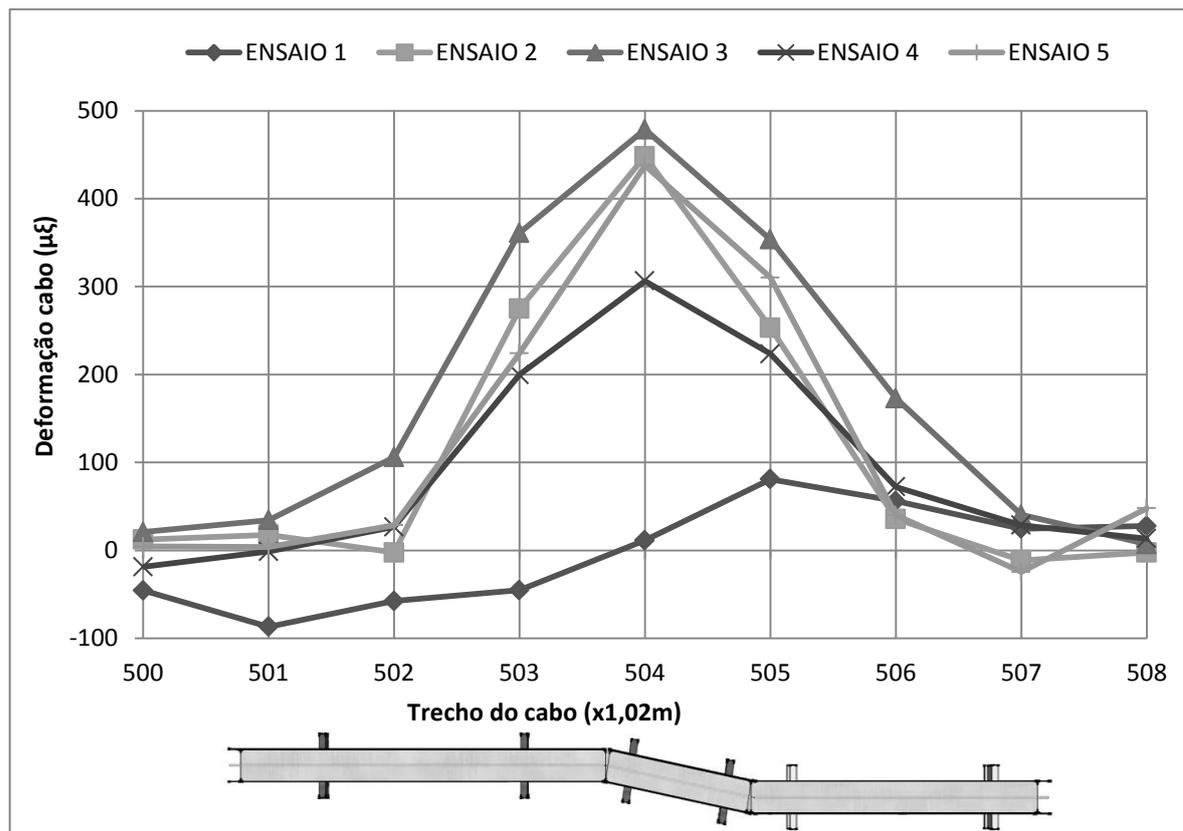


FIGURA 4.51. COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS NO DESLOCAMENTO APLICADO DE 0,8 CM

Observa-se que nos ensaios realizados com EDAF (Ensaio 2, 3, 4 e 5), as maiores deformações são registradas na zona de transição da caixa de cisalhamento, no ponto 504. No ensaio realizado sem EDAF não é possível identificar esta zona de transição. Os resultados mostram que o sistema de monitoramento é eficiente independentemente da posição das âncoras. Entretanto o espaçamento entre os EDAF em uma instalação em campo deve ser avaliado caso a caso.

O gráfico da Figura 4.52 mostra os resultados das deformações ao final dos ensaios, quando a parte móvel da caixa de cisalhamento estava deslocada em 20 cm da sua posição inicial. No gráfico também é mostrado para o Ensaio 2 as deformações registradas após 72 horas de ensaio e a reversão da parte móvel da caixa de cisalhamento para sua posição inicial.

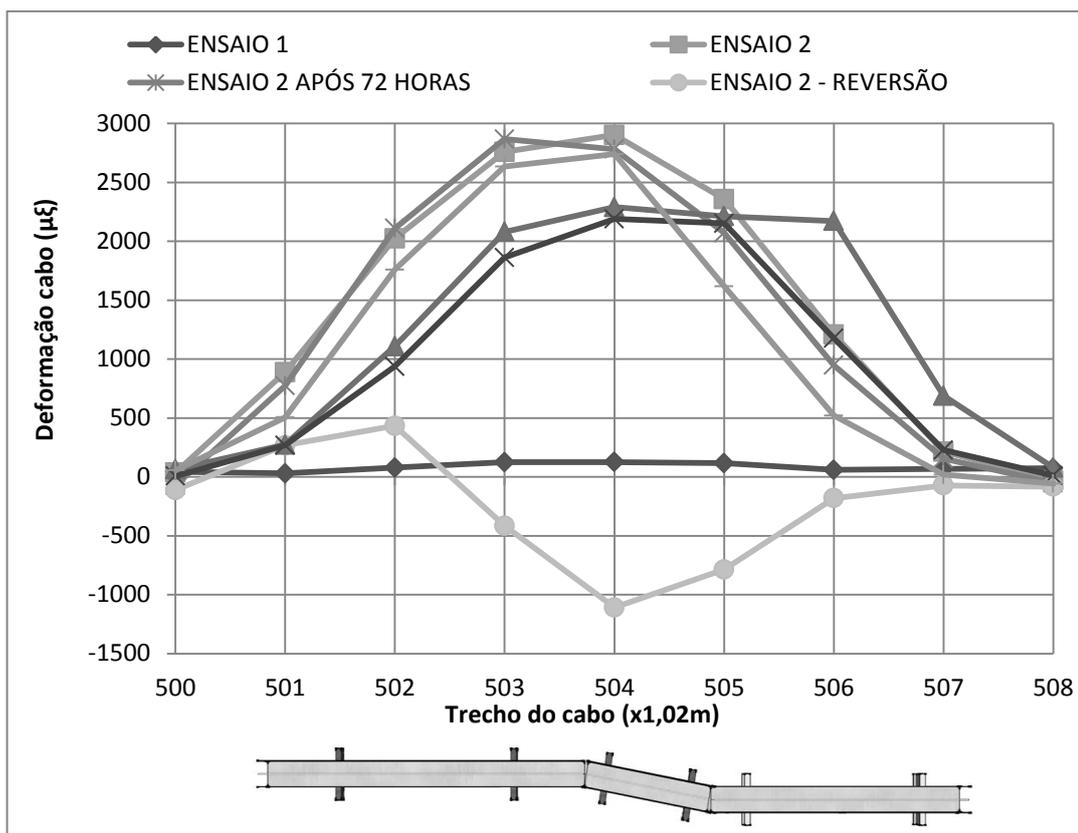


FIGURA 4.52. COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS NO DESLOCAMENTO APLICADO DE 20 CM

Os resultados apresentados no gráfico anterior mostram a eficiência dos sistemas de ancoragem. Nota-se que independente da configuração dos EDAF as maiores deformações são registradas sempre na zona de transição da caixa de cisalhamento. Quando não são instalados os EDAF no cabo de fibra óptica a localização da zona de transição, através das deformações registradas no cabo, não é possível.

As linhas que representam as deformações do Ensaio 2 após 72 horas do início do ensaio (ENSAIO 2 APÓS 72 HORAS) e logo após a deformação imposta na parte móvel da caixa de cisalhamento (ENSAIO 2), mostradas no gráfico da Figura 4.52 podem ser consideradas como sobrepostas, pois as variações da deformação em cada metro do cabo influenciado pelo ensaio são mínimas. Também é mostrado neste gráfico, para o Ensaio 2, a reversão da parte móvel da caixa de

cisalhamento para sua posição inicial. Os valores negativos, que indicam que o cabo de fibra óptica passou para uma deformação menor do que a deformação imposta no pré-tensionamento do cabo, também são registradas em maior intensidade no ponto 504, onde está localizada a zona de transição da caixa de cisalhamento. O pré-tensionamento do cabo no momento da sua instalação é importante para que o sensor distribuído de fibra óptica seja capaz de registrar forças de compressão que possam existir em um movimento de massa. Entretanto, esta força não pode ser maior do que a força de interação entre os EDAF e o solo, neste caso forças de tração não serão registradas, pois o cabo não irá se deformar.

5 CONCLUSÃO

Este capítulo aborda as conclusões da pesquisa a partir dos experimentos realizados em laboratório que possibilitaram controlar algumas condições de contorno, permitindo assim a comparação entre resultados.

Os objetivos que foram estabelecidos no início dos trabalhos, para o desenvolvimento de uma nova metodologia para monitorar movimentos de massa a partir de sensores distribuídos de fibra óptica, foram alcançados e os resultados mostram potencial para aplicação do sistema em campo. Este trabalho tem como principal resultado a apresentação de uma nova metodologia que além de possível, mostrou-se viável para o monitoramento de movimentos de massa em até 10 km de extensão.

5.1 SISTEMAS DESENVOLVIDOS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO CABO DE FIBRA ÓPTICA

Foram desenvolvidos na pesquisa dois sistemas para avaliação da possibilidade de uso cabos de fibra óptica em campo para monitoramento de movimentos de massa. O primeiro deles trata-se de um dispositivo para tracionamento do cabo, onde foi possível aplicar deslocamentos precisos, controlados através de um relógio comparador, e desta forma avaliar as deformações que são impostas no cabo de fibra óptica (Figura 5.1). Este dispositivo foi utilizado em todos os testes realizados com o cabo de fibra óptica (descritos nos itens 3.2.3, 3.2.4 e 3.2.5).

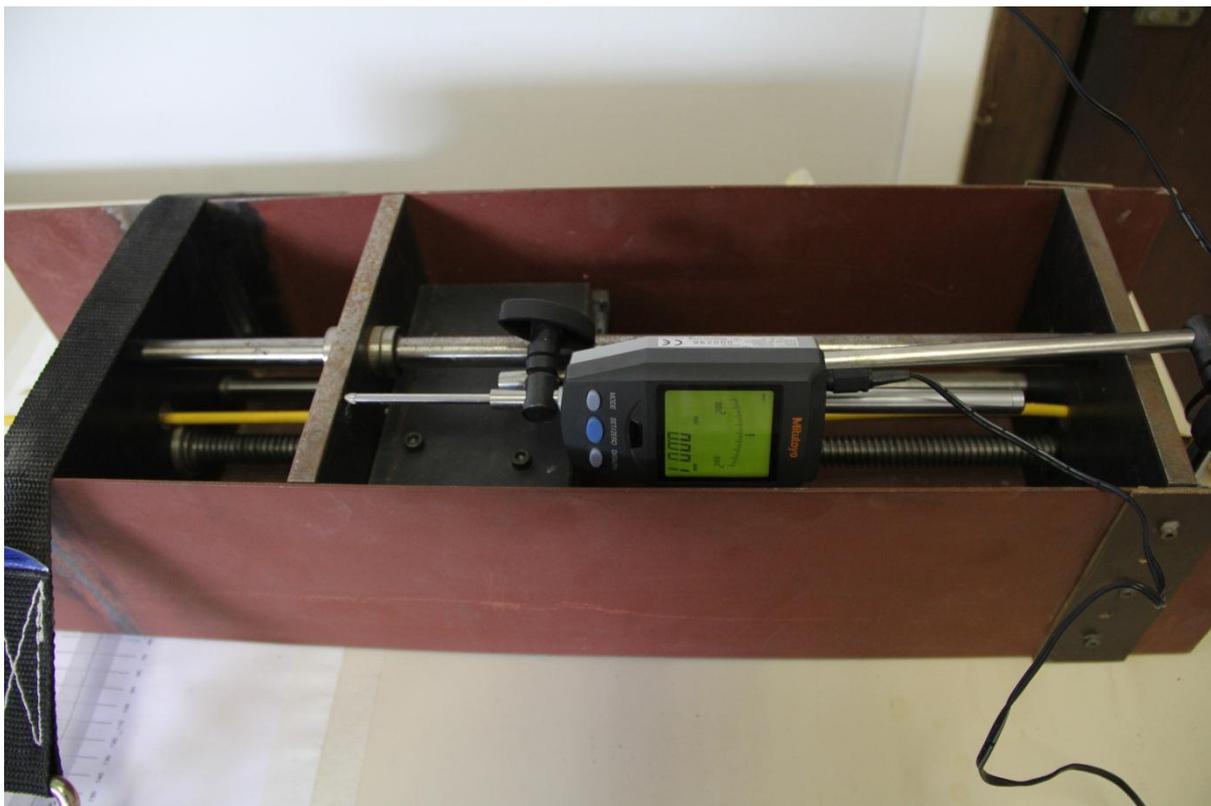


FIGURA 5.1. DISPOSITIVO PARA TRACIONAMENTO DE CABOS DE FIBRA ÓPTICA

O segundo dispositivo desenvolvido, foi denominado como caixa de cisalhamento. Este dispositivo foi montado através de um perfil metálico em formato de “U” que consiste em três partes denominadas como parte fixa, zona de cisalhamento ou zona de transição e parte móvel (Figura 5.2). O dispositivo foi fundamental para concluir o objetivo principal da pesquisa (simular a zona de transição entre uma massa de solo estável e uma massa de solo em movimento).

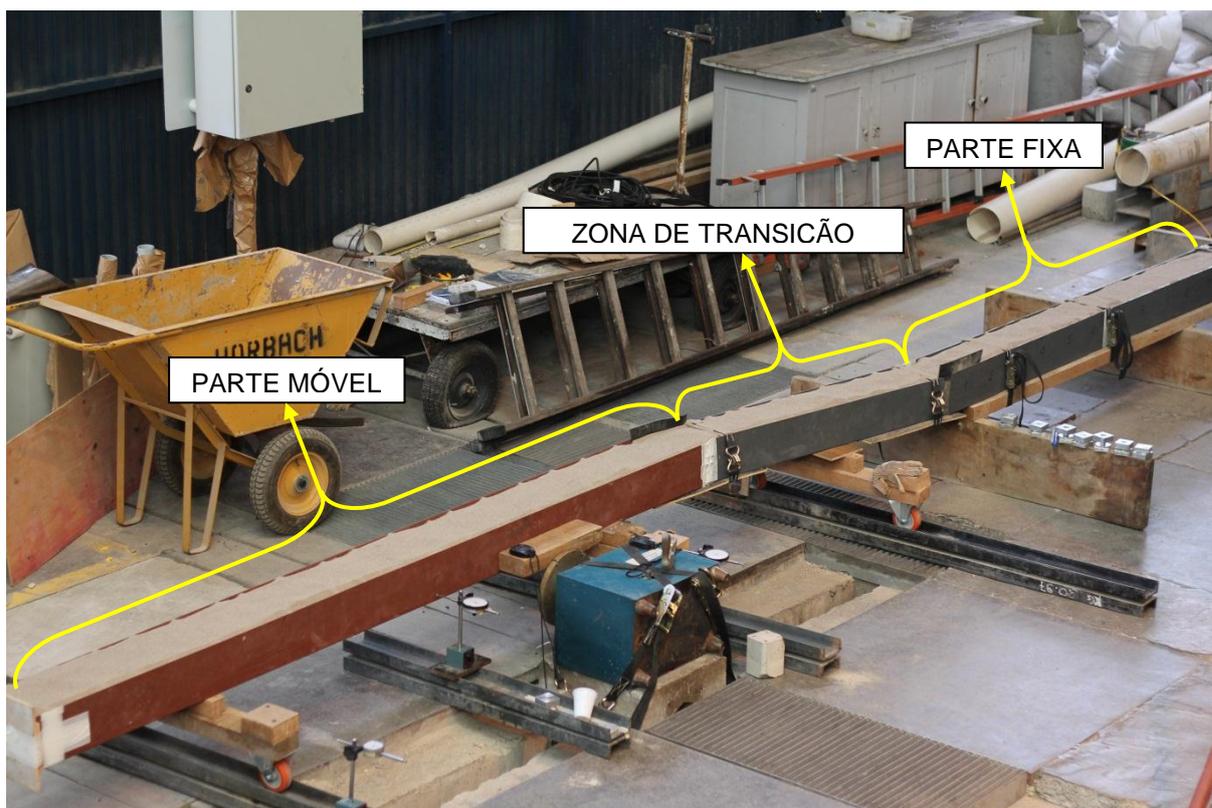


FIGURA 5.2. DISPOSITIVO PARA SIMULAR A ZONA DE TRANSIÇÃO

5.2 ELEMENTOS DE ANCORAGEM DO CABO DE FIBRA ÓPTICA (EDAF)

Os resultados obtidos nos testes de arrancamento (item 4.4) e nos testes para simular a zona de cisalhamento (item 0), mostraram que é fundamental a utilização destes elementos no cabo de fibra óptica para que o cabo possa acompanhar os mesmos movimentos do solo.

Os dois modelos de EDAF desenvolvidos são eficientes e podem ser utilizados em campo. O primeiro modelo desenvolvido e testado, EDAF de 25 mm de aresta com sistema de prensa-cabos em *Nylon* (Figura 5.3), têm custos mais elevados, pois o processo de fabricação das peças é mais detalhado e o modelo é reproduzido através de dois materiais, Alumínio e o *Nylon*. Este modelo pode ser utilizado para monitorar deformações com o cabo de fibra óptica em até 4.000 $\mu\epsilon$. Após este nível de deformação, o EDAF pode perder aderência com o cabo de fibra

óptica à medida que as forças de tração aumentam. Os resultados deste tipo de EDAF podem ser mais eficientes alterando a geometria e o material do prensa-cabos.

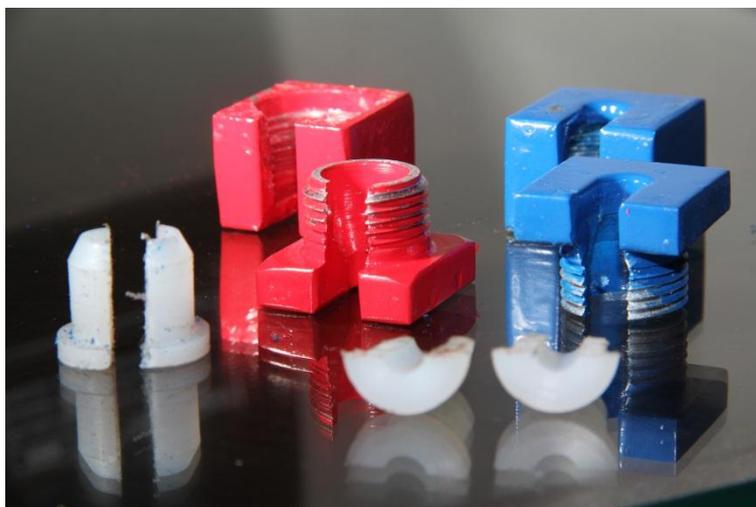


FIGURA 5.3. EDAF DE 25 MM COM SISTEMA DE PRENSA-CABOS EM NYLON

O segundo modelo de EDAF desenvolvido, como dimensões de 36 mm e 50 mm de aresta e sistema de prensa-cabos integrados (Figura 5.4), mostrou resultados melhores que os primeiros, mas similares entre si nos testes de arrancamento (item 4.4). Entretanto o modelo com 36 mm de aresta apresentava dificuldades na instalação do elemento ao cabo de fibra óptica. Dependendo do torque aplicado entre as duas partes do EDAF, o sinal óptico na fibra era interrompido. O motivo pelo qual o sinal é interrompido deve-se a área de contato entre a arruela do EDAF e o cabo de fibra óptica, que provoca uma tensão pontual esmagando o núcleo da fibra. O processo de fabricação deste modelo tornou-se mais simples, reduzindo os custos de fabricação destes elementos.



FIGURA 5.4. EDAF DE 36 E 50 MM COM SISTEMA DE PRENSA-CABOS INTEGRADOS

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As conclusões deste trabalho permitem sugerir alguns trabalhos futuros com a utilização da tecnologia do sistema distribuído de fibra óptica. A principal delas é a aplicação deste sistema em campo, seja em um talude natural, onde o cabo fibra óptica pode ser enterrado em uma vala com profundidade não superior a 50 cm ou em barragens de terra onde o cabo de fibra óptica pode ser disposto no momento em que a compactação da barragem é realizada.

Além da disposição do cabo subsuperficialmente no terreno pode-se instalar o cabo de fibra óptica em poços verticais (furos de sondagens) para detectar a profundidade onde está ocorrendo a ruptura do maciço de terra. Uma limitação desta aplicação é o fato de não ser possível a determinação da direção do movimento.

Um aprimoramento deste trabalho pode ser realizado para verificar a sensibilidade na detecção de movimento com o sistema distribuído de fibra óptica. Com objetivo de detectar movimentos de massa menores, a partir da utilização da

caixa de cisalhamento, pode-se reduzir a velocidade de deslocamento da parte móvel da caixa, assim a unidade leitora DTSS poderá registrar deslocamentos menores no intervalo de tempo mínimo de aquisição de dados (intervalo de tempo de 2 minutos). Para velocidades menores, o sistema de movimentação da caixa (prensa axial) deve ser substituído por um sistema automatizado. Este sistema deve permitir o controle deslocamento constante, ajustável e de velocidade inferior ao utilizado nesta pesquisa. Além da redução da velocidade de deslocamento, podem ser utilizados outros tipos de solos, como solos coesivos, para avaliação do sensor distribuído de fibra óptica com a utilização dos EDAF para a identificação da zona de cisalhamento.

A partir dos resultados obtidos nos testes de arrancamento e nos testes para simulação da zona de cisalhamento pôde-se estimar um modelo teórico para interpretação do comportamento gráfico em um movimento de massa. A Figura 6.1 ilustra uma encosta onde um sensor distribuído de fibra óptica é disposto em duas configurações na face do talude. Na primeira configuração, ilustrada na imagem à esquerda, a fibra óptica é disposta no sentido transversal à inclinação do talude. Na segunda configuração, ilustrada na imagem à direita, a fibra óptica é disposta no sentido longitudinal à inclinação do talude. Abaixo das figuras que representam a encosta é indicado o comportamento gráfico (comprimento do cabo de FO versus deformação do cabo) para cada uma das situações. Salienta-se que as duas configurações podem e devem ser aplicadas simultaneamente no terreno (longitudinalmente e transversalmente) para o monitoramento de movimentos de massa. Nas ilustrações em questão as duas configurações foram separadas para simplificação do método.

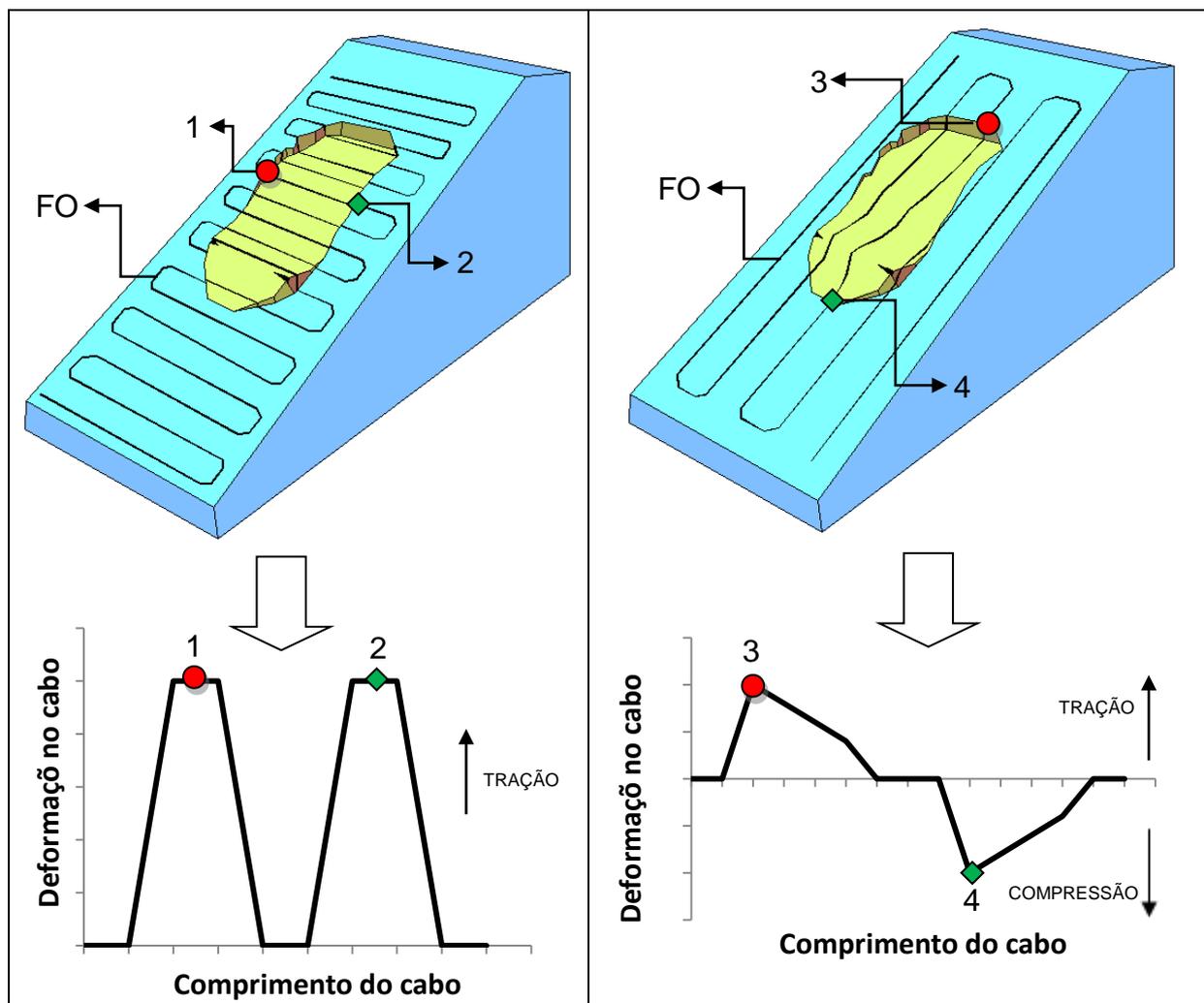


FIGURA 6.1. INTERPRETAÇÃO DO MOVIMENTO COM SENSOR DISTRIBUÍDO DE FIBRA ÓPTICA

Os pontos indicados na Figura 6.1 como “1” e “2” possuem comportamento gráfico na forma trapezoidal e indicam zonas de cisalhamento. Pode-se afirmar a ocorrência deste comportamento a partir dos resultados obtidos nos testes realizados em laboratório para simular a zona de cisalhamento utilizando os EDAF (item 0). Os pontos indicados como “3” e “4”, possuem comportamento gráfico na forma trigonal e indicam tração e compressão no cabo de fibra óptica, respectivamente. Pode-se afirmar a ocorrência deste comportamento a partir dos resultados obtidos nos testes de arrancamento (item 4.4).

Em uma instalação em campo, o local de instalação do cabo de fibra óptica deve ser demarcado topograficamente, possibilitando assim identificar a posição

aproximada onde está localizada a zona de transição entre a massa de solo em movimento e a massa de solo estável. Salienta-se que os EDAF contribuem essencialmente nesta identificação.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFONSO, H. M. M. **Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento**. Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil., 2004.

BAILEY, D.; WRIGHT, E. **Practical Fiber Optics**. Inglaterra: Newnes, 2003.

BENNETT, P. **Distributed Optical Fibre Strain Measurements in Civil Engineering**. Geotechnical Instrumentation News, December, 2008.

CRUZ, P. T. **100 Barragens brasileiras – Casos históricos, Materiais de construção e Projeto**. Oficina de textos. Segunda Edição, 2004.

CAVALCANTI, R. J. B. S., SOUZA, R. J. B., FILHO, P. R., ALBUQUERQUE, F. S. **Utilização de eletrônicos na monitoração da barragem de Xingó**. XII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Rio de Janeiro, 1994. Volume I.

COOKE, R. W. e PRICE, G. (1974). **Horizontal inclinometers for the measurement of vertical displacement in the soil around experimental foundations**. Field instrumentation in geotechnical engineering, p. 112-125.

DUNNICLIFF, J. (1988). **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**, New York, John Wiley & Sons, Inc. 577p.

ERVIDEIRA, A. **O sistema GPS no controlo de deslizamentos**. Programa de Estudos Graduados – Mestrado em Engenharia Geográfica e Geoinformática – SIG. Departamento de Matemática – Faculdade de Ciência da Universidade de Lisboa, 2004.

FREUDENRICH, C. **How Fiber Optics Work**. Acessado em: 09/08/2012.

Disponível em: <http://electronics.howstuffworks.com/fiber-optic.htm>.

FONSECA, A. R. (2003). **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São Simão**. Universidade Federal de Ouro Preto.

GOKON Incorporated. Disponível em: <http://www.geokon.com/gtilt-plus-inclinometer-software/> (Acessado em 11/02/2013).

GLISIC, B.; INAUDI, D. **Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring**. Inglaterra: John Wiley and Sons, 2007. 262 p.

HOEPFFNER, R.; SINGER, J.; THURO, K.; AUFLEGER, M. **Development of an integral system for dam and landslide monitoring based on distributed fibre optic technology**. British Dam Society. 15th Biennial Conference on “Ensuring Reservoir Safety into Future” to be held at the University of Warwick, 10 – 13 September 2008.

HUNT, R. E. (2005). **Geotechnical Engineering Investigation Handbook**. 2nd edition, Taylor and Francis.

ITEN, M. (2011). **Novel Applications of Distributed Fiber-Optic Sensing in Geotechnical Engineering**. Dissertation submitted to ETH Zurich for the degrees of Doctor of Sciences.

JORGE F. N., BAPTISTI E., GONÇALVES A. **Monitoramento em aterros sanitários nas fases de encerramento e de recuperação: Desempenho mecânico e ambiental**. Seminário sobre resíduos sólidos. ABGE, 2004.

KANJI, M. A. (1990). **Algumas reflexões sobre a instrumentação de barragens**”, Rio de Janeiro, **Simpósio sobre Instrumentação Geotécnica de Campo – SINGEO’90**, ABMS, Rio de Janeiro.

KEISER, G. **Optical Fiber Communications**, 2rd edition, USA: Mc Grall-Hill, 1991.

KHAMARRUL, A.R. e WAN, A. W. A. **An Appropriate GPS Technology for Landslide Monitoring at East-West Highway, Perak, Malaysia**, GIS Development, Faculdade de Ciências e Engenharias Geoinformáticas, Universidade de Tecnologia da Malásia, Johore, 2003. Acessado em maio de 2013. Disponível em: http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides/ma03115.htm.

KLUNT, R., WATLEY, D., FARHADIROUSHAN, M., PARK, D. S., LEE, S. U., KIM, J. T., KIM, Y. S. **Case Studies on Distributed Temperature and Strain Sensing (DTSS) by using optic fibre.** [http://www.sensornet.co.uk/files/article/Sensornet_Case_Studies_on_Distributed_Temperature_and_Strain_Sensing_\(DTSS\).pdf](http://www.sensornet.co.uk/files/article/Sensornet_Case_Studies_on_Distributed_Temperature_and_Strain_Sensing_(DTSS).pdf); Acessado em agosto de 2012.

LEE, B. **Review of the present status of optical fiber sensors.** Optical Fiber Technology, 9. 2003. p. 57-79.

MARINHO, F. A. M. **Investigação Geotécnica Para Quê?** Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. COBRAE – 2005 – Vol. 2.

MONICO, J.F.G., **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS Descrição, fundamentos e aplicações.** 1.ed. Presidente Prudente: Editora UNESP, 2000.

MORIKAWA, S. R. K. **Acelerômetro Triaxial a Redes de Bragg.** Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2004.

NELSON, R. A. **The Global Positioning System Via Satellite,** November 1999, http://www.atcourses.com/global_positioning_system.htm.

OLIVEIRA, T. C., SAYÃO, A. S. F. J., (2004). **Experiência brasileira na medição de deslocamentos em barragens de enrocamento.** 2º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, SPG/ABMS, Portugal. 10p.

PECK, R. B. **Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics.** Geotechnique. The Institution of Civil Engineers, London, 1969.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª edição. Oficina de textos, 2006.

PRESTI, D.C.F., PEDRONI, S., CRIPPA, V. **Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation** and by ASTM D 4253-83: A comparative study. Geotechnical Testing Journal. Vol. 15, nº 2, pp. 180-189. 1992.

PURZIN, A. M.; ITEN, M.; HAUSWIRTH, D. **Advanced Geotechnical Applications of Distributed Fiber-Optic Sensing**. Geotechnical Instrumentation News, 2010.

RIBEIRO, A. B. L. **Esquemas de Multiplexagem de Sensores de Fibra Óptica**. Tese de Doutorado, Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Porto. 1996.

RIFFEL, E. S. e GAUSSELLI, L. A. **Ocorrência de movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Paranhana – RS**. BGG 39 - p. 193-209 – julho de 2012.

ROCHA, R. P. O. **Instrumentação geotécnica com fibra ótica: monitoramento de frente de umedecimento e análise da variação do grau de saturação em solos arenosos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Construção Civil. Curitiba, 2011.

SANTOS, L. M. **Desenvolvimento de um sensor de fibra óptica embutido para a mediação de deformação lenta à tração em argamassa**. Universidade Federal de Santa Catarina. Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Florianópolis, 1999.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SOUZA, J. M.; ASEVEDO, L. A.; SOARES, I. L. P.; BERTOLINO, A. V. F. A. **Movimentos de massa na bacia do rio São Pedro, município de Nova Friburgo, associado ao evento de janeiro de 2011**. ACTA Geográfica, Boa Vista, Ed. Esp. Climatologia Geográfica, 2012. pp.149-163.

SOUZA, L. R. **Desenvolvimento de um sistema de instrumentação para medição do nível d'água com base na tecnologia de fibra óptica**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração Gestão e Transferência de Tecnologia, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná, 2012.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Instrumentation of Embankment Dams and Levees**. Manual No. 1110-2-1908, 1995.

WAH, C. K. **Aplicabilidade dos eletrônicos na instrumentação geotécnica**, Dissertação de mestrado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil., 1999.