

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DESENVOLVIMENTO DE UM INCLINÔMETRO

PARA MONITORAR O COMPORTAMENTO

DE TALUDES INSTÁVEIS DE SOLOS

MARCOS TORRES FORMOSO

Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA**.

Porto Alegre

1999

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação.



Prof. Adriano Virgilio Damiani Bica

Orientador



Prof. Luiz Antônio Bressani

Co-Orientador



Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal

Coordenador do PPGEC

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Leite Maciel Filho

D. Sc. - USP

Prof. Renato Machado de Brito

D. Sc. - UFRGS

Prof. Washington Peres Núñez

D. Sc. - CPGEC / UFRGS

Dedico este trabalho

à minha filha

Carolina

“Tudo vale a pena...

Quando a alma não é pequena.”

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

Apresento aqui os meus agradecimentos àqueles que muito colaboraram para o bom andamento desta dissertação:

À minha esposa, Rita, companheira dos dias fáceis e difíceis, que abriu mão de seu tempo comigo para a conclusão desta dissertação.

Aos meus pais pelo apoio, pelo meu espírito técnico e crítico e pela colaboração dada para a conclusão desta dissertação.

Aos meus orientadores, Adriano V. D. Bica e Luiz A. Bressani, pela orientação, pela paciência e pela perseverança, sem as quais esta dissertação não seria concluída.

Aos demais professores da Área de Geotecnia do CPGEC, como o Nilo, o Fernando, o Ceratti, a Regina, a Wai, o Azambuja e o Maciel, pela compreensão e pelo maravilhoso curso.

Aos meus colegas de mestrado, da minha turma e de outras, com os quais convivi durante o curso, principalmente aqueles que se tornaram meus amigos, e os são ainda hoje, como a Suyen, o Thomé, o Mantaras, o Rinaldo, o Mauro e o Washington.

Aos funcionários do CPGEC, principalmente o Jair e o João Nelson, pelo auxílio prestado para a execução da parte prática da dissertação.

Ao professor Renato M. de Brito e seus alunos do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, pelo desenvolvimento do Sistema Automático de Controle e Aquisição de Dados.

A Amadeu A. Stein e Marcos M. Leite, especialistas em desenhos digitais, pelas figuras da dissertação.

A minha irmã, Fátima, pelo auxílio na solução dos problemas de informática.

Ao CNPq, pelo financiamento da minha bolsa de mestrado e à FINEP, que através do PADCT, financiou o desenvolvimento da dissertação.

E, finalmente, a todos os meus amigos que direta ou indiretamente colaboraram para que eu concluísse esta dissertação.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO	1
2 CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS COLUVIAIS TROPICAIS	4
2.1 SOLOS COLUVIAIS EM PORTO RICO.....	4
2.2 CASOS HISTÓRICOS NO BRASIL.....	9
2.2.1 A Serra do Mar em São Paulo.....	9
2.2.2 A Encosta do Soberbo.....	11
2.2.3 Solos Coluviais no Rio Grande do Sul.....	15
3 MONITORAÇÃO DO MOVIMENTO DE TALUDES INSTÁVEIS	18
3.1 PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO.....	19
3.2 TIPOS DE MEDIÇÕES REQUERIDAS.....	20
3.3 SELEÇÃO DOS INSTRUMENTOS.....	21
3.4 SELEÇÃO DA LOCAÇÃO DOS INSTRUMENTOS.....	24
3.5 LEVANTAMENTOS DE SUPERFÍCIE.....	26
3.5.1 Outros Tipos de Levantamento de Superfície.....	29
3.5.2 Monitoramento de Trincas.....	29
3.5.3 Tiltímetros.....	30
3.6 MONITORAMENTO DE DEFORMAÇÕES SUBSUPERFICIAIS.....	31
3.7 O USO DE INSTRUMENTAÇÃO DE CAMPO EM TALUDES.....	34
3.8 O USO DE INSTRUMENTAÇÃO DE CAMPO EM TALUDES DE SOLOS COLUVIAIS BRASILEIROS.....	39
3.8.1 A Encosta da Serra do Mar na Rodovia dos Imigrantes.....	40
3.8.2 Instrumentação da Encosta do Soberbo.....	42
4 INCLINÔMETROS, TRANSDUTORES E TUBOS GUIAS	48
4.1 INSTRUMENTOS PARA LEVANTAMENTO EXPEDITO.....	48
4.2 INCLINÔMETROS CONVENCIONAIS.....	49

4.3 INCLINÔMETROS FIXOS.....	51
4.3.1 Aplicação de Inclinômetros Fixos.....	54
4.4 INCLINÔMETRO INTERMITENTE.....	56
4.5 TUBOS GUIAS.....	56
4.5.1 Tubos Guias com Ranhuras Espiraladas.....	59
4.5.2 Outros Problemas na Instalação de Tubos Guias.....	60
5 INCLINÔMETRO COM SENSORES DE EFEITO HALL.....	65
5.1 O EFEITO HALL.....	65
5.2 OS SENSORES DE EFEITO HALL.....	66
5.3 TRANSDUTORES COM SENSORES DE EFEITO HALL.....	72
5.4 DESCRIÇÃO DO TORPEDO DO INCLINÔMETRO.....	75
5.4.1 Protótipo do Transdutor.....	77
5.4.2 O Torpedo e o Transdutor Desenvolvidos.....	77
5.4.3 Cabo Elétrico de Sustentação Alimentação e Leitura.....	82
5.4.4 Rodas Guias do Torpedo.....	83
5.4.5 Dimensões Externas do Torpedo.....	85
5.4.6 Equipamento Necessário ao Funcionamento e Calibração.....	87
5.4.7 O Sistema Automático de Controle e Aquisição de Dados.....	87
6 CALIBRAÇÃO DO TORPEDO DO INCLINÔMETRO.....	90
6.1 CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO DO TRANSDUTOR.....	90
6.2 DESENVOLVIMENTO DO CALIBRADOR DO INCLINÔMETRO.....	91
6.3 PRIMEIRAS CALIBRAÇÕES DO INCLINÔMETRO.....	96
6.4 PROBLEMAS DE HISTERESE E INSTABILIDADE.....	97
6.5 TROCA DE SENSORES DE EFEITO HALL.....	101
6.6 CALIBRAÇÕES SATISFATÓRIAS.....	101
6.7 EQUAÇÕES DEFINIDAS PELAS CALIBRAÇÕES.....	105
6.8 CALIBRAÇÕES E SIMULAÇÕES DE OUTROS AUTORES.....	106
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	108
7.1 CONCLUSÕES.....	108
7.2 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	109
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
9 TRABALHOS PUBLICADOS.....	114

LISTA DE FIGURAS

2.1 Detritos de deslizamento sobre um solo residual.....	7
2.2 Talude com solo coluvial sobre um perfil normal de solo residual.....	8
2.3 Perfil de solo esquemático dos taludes da Serra do Mar em locais elevados, mostrando o decréscimo da alteração com a profundidade e o posicionamento usual das superfícies de deslizamento	10
2.4 Mapa do Escorregamento da Encosta do Soberbo, com as zonas respectivas, ocorrido em 1966.....	14
3.1 Monitoração do movimento em um talude em deslizamento típico.....	27
3.2 Princípio de operação de um inclinômetro.....	33
3.3 Instrumentação do Escorregamento da Encosta do Soberbo.....	46
3.4 Medições inclinométricas (deslocamento por profundidade) do Escorregamento do Soberbo.....	47
4.1 Instalação e detalhe de um inclinômetro fixo.....	53
4.2 Seção típica do tubo guia	58
4.3 Deflexões em um tubo guia não cimentado.....	63
4.4 Posição da roda guia dentro de uma abertura de junta.....	63
4.5 Posições que o torpedo pode assumir devido às rodas guias nas juntas.....	64
5.1 Configurações básicas de sistemas sensor-magneto.....	68
5.2 Conexões elétricas do sistema sensor-magneto.....	69
5.3 Relação voltagem/deslocamento de saída.....	70
5.4 Efeito da variação do espaçamento “G” e da separação “S” na saída da configuração duplo magneto, bipolar com deslocamento lateral.....	71
5.5 Célula de tensão normal total.....	74
5.6 Célula de tensão de cisalhamento de contorno.....	74
5.7 Transdutor com Sensores de Efeito Hall.....	78
5.8 Fotos do transdutor com Sensores de Efeito Hall.....	79
5.9 Torpedo do inclinômetro.....	80
5.10 Foto do torpedo do inclinômetro.....	81

5.11 Foto do torpedo com as rodas guias.....	84
6.1 Gráfico de calibração do protótipo do transdutor.....	92
6.2 Calibrador do inclinômetro.....	94
6.3 Foto do calibrador do inclinômetro.....	95
6.4 Gráfico de calibração do transdutor inferior com histerese.....	100
6.5 Gráfico de calibração do transdutor superior.....	103
6.6 Gráfico de calibração do transdutor inferior.....	104

RESUMO

Um inclinômetro está sendo desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) para monitorar o comportamento de taludes instáveis de solos coluviais. Esses taludes são muito comuns nas encostas das serras brasileiras. Os solos coluviais presentes nesses taludes caracterizam-se por estar em movimento lento e constante. Durante ou logo após chuvas intensas, esse movimento tende a se acelerar. Portanto, para monitorar as deformações subsuperficiais da massa de solo desses taludes, é altamente interessante utilizar inclinômetros. São geralmente utilizados inclinômetros convencionais, mas é necessário utilizar inclinômetros fixos ou intermitentes, como o do presente trabalho, para o monitoramento contínuo e automático das deformações. O inclinômetro desenvolvido possui um transdutor com sensores de Efeito Hall que obteve desempenho satisfatório como transdutor de inclinação. Logo, quando se utilizar o inclinômetro com Sensores de Efeito Hall, poderão ser realizadas leituras contínuas de deformações subsuperficiais mesmo durante chuvas intensas ou durante o evento de ruptura desses taludes.

ABSTRACT

An inclinometer was developed at The Soil Mechanics Laboratory of Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS) to monitor the behaviour of unstable slopes of colluvial soils. These slopes are very common in the Brazilian mountain slopes. The colluvial soils that exist in these slopes are characterized by moving slowly and continuously. Intense rainfalls cause the acceleration of this soil movement. Therefore, the use of inclinometers is highly interesting for monitoring the subsurface displacements of the soil mass of these slopes. Conventional inclinometers are often used for this purpose, but it is highly desirable to use fixed or intermittent inclinometers for monitoring the displacements continuously and automatically. The inclinometer, developed in this dissertation, has a transducer built with Hall Effect Sensors. This transducer had satisfactory performance as a tilt transducer. Hence, when the Hall Effect Sensor inclinometer is used, it will be possible to carry out continuous readings of subsurface displacements during intense rainfall or during the event of rupture for these slopes.

1 INTRODUÇÃO

O comportamento dos taludes naturais submetidos às variações climáticas tropicais, como estações secas seguidas de estações chuvosas com precipitações intensas, pode ser melhor compreendido com o auxílio dos recursos atuais de instrumentação e análise. Os taludes de corte, nessa situação, possuem comportamento análogo aos taludes naturais. A instrumentação de taludes instáveis, em especial o monitoramento de deformações da massa de solo instabilizada em profundidade, é o cerne deste trabalho.

As encostas das serras brasileiras apresentam muitos taludes de solos coluviais tropicais. A movimentação e ruptura desses taludes causam prejuízos às obras de engenharia construídas nestas encostas. Os solos coluviais presentes nestes taludes se caracterizam por estarem em movimento lento e constante. Esse movimento tende a acelerar durante ou logo após precipitações intensas. O uso de inclinômetros para estudar o movimento dessas massas de solo é sugerido nesse trabalho.

Um inclinômetro está sendo desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Solos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Esse inclinômetro, projetado e em elaboração, será instalado permanentemente em taludes de solos coluviais tropicais com o objetivo de monitorá-los continuamente. Assim serão obtidas leituras contínuas de deformações subsuperficiais mesmo durante precipitações intensas. Este monitoramento permitirá uma compreensão maior do comportamento de taludes instáveis de solos coluviais.

No princípio do desenvolvimento do inclinômetro, a aplicação deste instrumento seria monitorar o comportamento de taludes de solos coluviais. Chegou-se à conclusão, entretanto, que qualquer talude instável pode ser monitorado por este instrumento, dependendo do tipo de movimentação da massa de solo. Sempre que for necessário monitorar continuamente as deformações subsuperficiais horizontais de um talude instável,

independente do tipo de solo, o inclinômetro aqui desenvolvido pode ser utilizado. Outra aplicação possível seria o monitoramento de deformações em obras de engenharia como, por exemplo, cortinas de contenção de taludes ou maciços de barragens.

No entanto, tornou-se necessário que um fenômeno típico, como a instabilidade de taludes de solos coluviais, fosse estudado para mostrar a necessidade de se desenvolver um inclinômetro para o monitoramento de deformações contínuas. Então, uma definição clássica de solos coluviais é apresentada no segundo capítulo deste trabalho. Suas características intrínsecas são descritas. São citados, também, casos históricos brasileiros e gaúchos de instabilidade de taludes de solos coluviais.

A monitoração do movimento de taludes instáveis através de instrumentação é abordada no terceiro capítulo. Os instrumentos mais comuns utilizados para monitorar superficialmente e subsuperficialmente o movimento de taludes são comentados. O inclinômetro é apresentado como instrumento apropriado para medir deformações subsuperficiais na massa de solo em movimento de um talude. São citados também casos históricos de uso de instrumentação de campo para monitorar taludes instáveis. Finalmente, são citados casos históricos brasileiros.

Os tipos de inclinômetros, com seus respectivos transdutores são descritos no quarto capítulo. São comentados, primeiramente, os tipos convencionais de inclinômetro. Em seguida, são apresentados os inclinômetros fixos. Nesse capítulo é definido o inclinômetro intermitente, instrumento proposto neste trabalho. Finalmente, os tubos guias de inclinômetro são descritos e comentados.

No quinto capítulo, são apresentados os Sensores de Efeito Hall. A concepção do inclinômetro com Sensores de Efeito Hall e o desenvolvimento do transdutor deste inclinômetro são cuidadosamente descritos. Também é citado, nesse capítulo, o desenvolvimento do sistema automático de aquisição de dados.

No sexto capítulo são apresentadas as calibrações experimentais do transdutor do inclinômetro com Sensores de Efeito Hall. São comentados os problemas

encontrados e as soluções adotadas. Nesse capítulo são mostrados resultados dessas calibrações.

As conclusões deste trabalho estão apresentadas no sétimo capítulo. Nesse capítulo também são apresentadas sugestões para futuras pesquisas.

2 CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS COLUVIAIS TROPICAIS

O desenvolvimento de um instrumento para monitorar a deformação subsuperficial da massa de solo durante o fenômeno da ruptura exige o estudo do comportamento desse solo. A caracterização de um solo coluvial, seu modo de formação, sua constituição, seu comportamento sob condições climáticas adversas e seu modo de ruptura são, portanto, informações essenciais para a concepção desse instrumento. Estão apresentadas, nesse capítulo, as caracterizações de solos coluviais em regiões tropicais.

2.1 SOLOS COLUVIAIS EM PORTO RICO

Os taludes de solos coluviais de Porto Rico, no Mar do Caribe, uma região tropical semelhante a muitas regiões brasileiras, foram estudados no trabalho clássico desenvolvido por Deere e Patton (1971). Estes solos coluviais são originados de solos residuais tropicais que apresentam evolução pedogênica - a existência de horizontes "A e B" definidos.

Segundo Deere e Patton (1971), a origem de muitos solos coluviais parece ser de rupturas de massas de solo que ocorreram mais acima em um talude. Por isso, o conceito de solo coluvial abrange escorregamento de fragmentos de solo e rocha assim como depósitos pluviais de um talude.

Escorregamentos em camadas rasas de solos coluviais são comuns em regiões de clima tropical e subtropical (Deere e Patton, 1971). A camada de solo coluvial é frequentemente mais permeável do que os horizontes "A e B" do solo residual existente abaixo. Portanto, é comum se encontrar nessa camada níveis de água elevados e isolados. Esta água ajuda a reduzir a resistência ao cisalhamento dos materiais das camadas inferiores

e, a criar forças de percolação adversas no solo coluvial. Durante períodos de chuvas intensas, as águas superficiais e subsuperficiais promovem a desagregação retroprogressiva – erosão – da rasa camada de solo coluvial. O processo pode continuar até que toda a camada seja removida da encosta, ou até esse processo erosivo remover o solo que não é retido pelas raízes da vegetação.

Escorregamentos profundos em solos coluviais podem ocorrer durante a escavação de um corte, ou mais tarde, depois do corte aberto, durante períodos de chuvas intensas. Muitos planos de fraqueza podem estar presentes. Isto inclui o horizonte “B” do solo residual da camada inferior e qualquer perfil de solo desenvolvido dentro do solo coluvial. As condições de saturação, estratigrafia e posição do solo coluvial e da camada de solo residual inferior devem ser anteriormente conhecidas para que seja possível prever o fator de segurança do talude estudado.

Conforme Deere e Patton (1971), os perfis típicos de solos coluviais podem ser resumidos em dois casos:

- a) camada simples de solo coluvial;
- b) uma série de camadas de solos coluviais.

Taludes com um manto de solo coluvial cobrindo o perfil de solo residual são freqüentemente encontrados no pé de escarpas e em taludes muito íngremes. Comumente uma camada simples de solo coluvial cobre o talude como é indicado na figura 2.1.

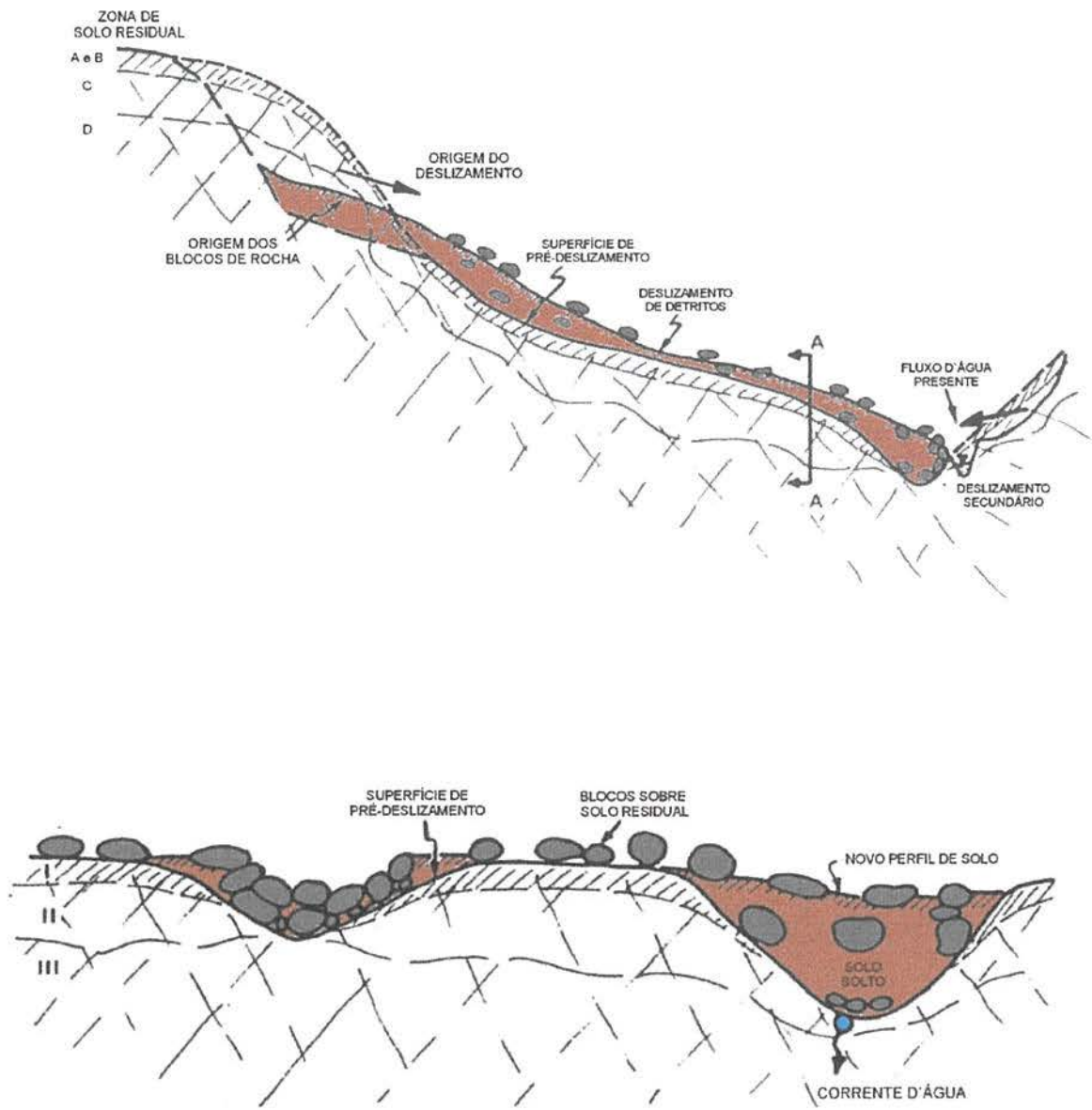
Com o passar do tempo, o solo coluvial torna-se dessecado ou consolidado pelo peso das camadas sucessivas de detritos deslizados e, eventualmente, uma série complexa de camadas de solo coluvial pode desenvolver-se. Estas camadas cobrem um perfil de solo residual comum pré-existente e ocorre um desenvolvimento limitado do perfil de solo em cada camada (ver fig. 2.2). A presença do perfil de solo residual coberto é muito significativa, porque fornece um exemplo clássico de um aquífero artesiano inclinado na base do solo coluvial. Ainda mais, o topo de cada camada pode tornar-se retrabalhada e zonas mais permeáveis podem-se desenvolver nesta posição ou dentro de uma camada individual. A dimensão dos materiais constituintes e a permeabilidade do solo coluvial tende a decrescer

talude abaixo, devido provavelmente à migração de partículas mais finas do solo coluvial para a porção inferior provocada pela percolação d'água. Portanto, zonas permeáveis são comuns em solos coluviais na qual a água pode entrar mais rapidamente a montante do que sair a jusante. As partes superiores do solo coluvial não são somente mais permeáveis ao movimento horizontal da água, mas estas partes também são comumente muito permeáveis na direção vertical, a qual permite infiltração rápida do escoamento superficial.

Durante o período de chuvas intensas, a entrada de água é facilitada através de aquíferos de pequena espessura nas camadas de solo coluvial, entrando mais rapidamente do que pode sair. Excesso de pressão neutra, então, pode desenvolver-se no talude.

Com a combinação de um ou mais níveis piezométricos e uma ou mais camadas inclinadas de solo rico em argila no perfil de solo coluvial, este talude pode facilmente romper. O deslizamento pode ocorrer durante a escavação, ou algum tempo após a construção, devido a um período de chuvas excepcionalmente intenso.

A ruptura desses taludes pode também ocorrer sem o desenvolvimento de excesso de pressão neutra. Quando solos coluviais são confundidos com solos residuais e um corte é executado tão íngreme quanto o solo residual permitiria, o solo coluvial pode desagregar. Tal fenômeno acontece porque, em taludes equivalentes, o solo coluvial é menos resistente e mais sujeito à desagregação do que o solo residual.



CORTE A - A

Figura 2.1 - Detritos de deslizamento sobre o solo residual (fonte: Deere e Patton, 1971).

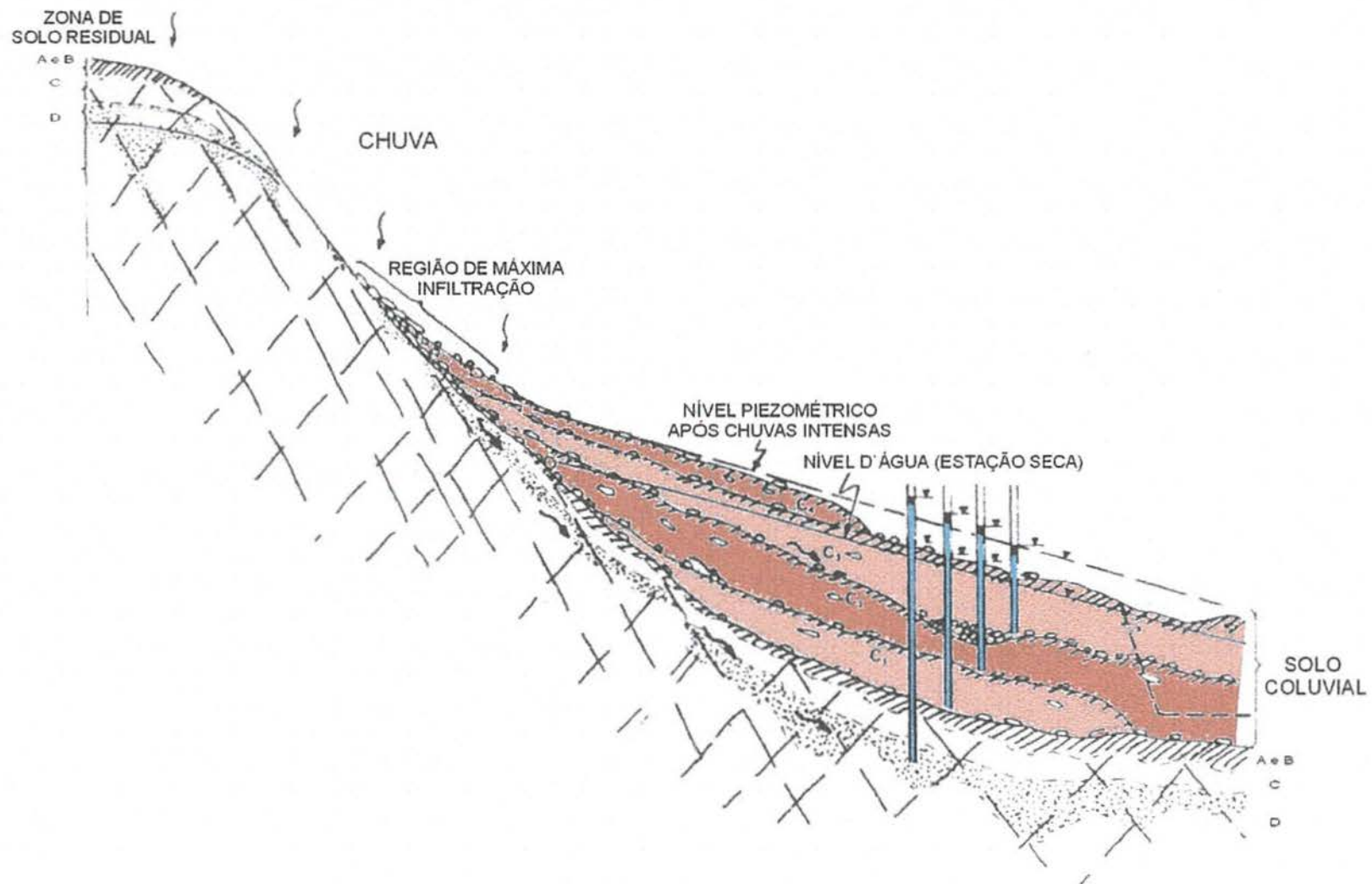


Figura 2.2 - Talude com solo coluvial sobre um perfil normal de solo residual (fonte: Deere e Patton, 1971).

2.2 CASOS HISTÓRICOS NO BRASIL

Os solos coluviais tropicais são comuns nas encostas das serras brasileiras. No presente trabalho, é apresentada uma descrição de casos históricos destes solos com seu problema de estabilidade.

2.2.1 A SERRA DO MAR EM SÃO PAULO

A Serra do Mar, no litoral da Região Sudeste, é uma escarpa de 1000 m de altura. Seus solos residuais e vegetação tropical estão submetidos, mesmo em condições naturais, a freqüentes deslizamentos durante períodos de chuvas intensas. No Estado de São Paulo, Wolle e Hachich (1989) estudaram o comportamento destas encostas, cuja tendência natural à instabilidade tem sido agravada pela construção de rodovias, ferrovias, oleodutos e linhas de alta tensão que ligam a Cidade de São Paulo a Santos. Nessas encostas é muito comum a ocorrência de solos coluviais instáveis.

Rochas pré-cambrianas, principalmente migmatitos e também granitos e gnaisses, eventualmente com xistosidade, constituem a Serra do Mar. Os horizontes de solo são muito finos, raramente excedendo 3 m nas elevações médias a altas da escarpa principal. O perfil de solo encontrado nessas encostas pode ser descrito do seguinte modo: um horizonte superficial de solo coluvial, com 1,0 a 1,5 m de espessura, cobrindo um horizonte de solo residual jovem, também definido como solo saprolítico, possuindo características herdadas da rocha mãe, com 1,0 a 2,0 m de espessura. Abaixo desses horizontes de solo existe uma zona de blocos de rocha alterada, denominada de saprolito, cuja sanidade aumenta com a profundidade, mas sempre exibindo fraturas abertas.

A feição descrita por Wolle e Hachich (1989), mostrada na figura 2.3, fornece a estas escarpas um comportamento hidrogeológico peculiar: A condutividade hidráulica da rocha fraturada é maior do que a dos horizontes de solo de cobertura, tanto que a rocha atua como dreno para esses horizontes. Conseqüentemente, ao invés de se desenvolver no horizonte de solo saprolítico, o nível de água permanece restrito a profundidades de 20 a 30 metros na rocha fraturada.

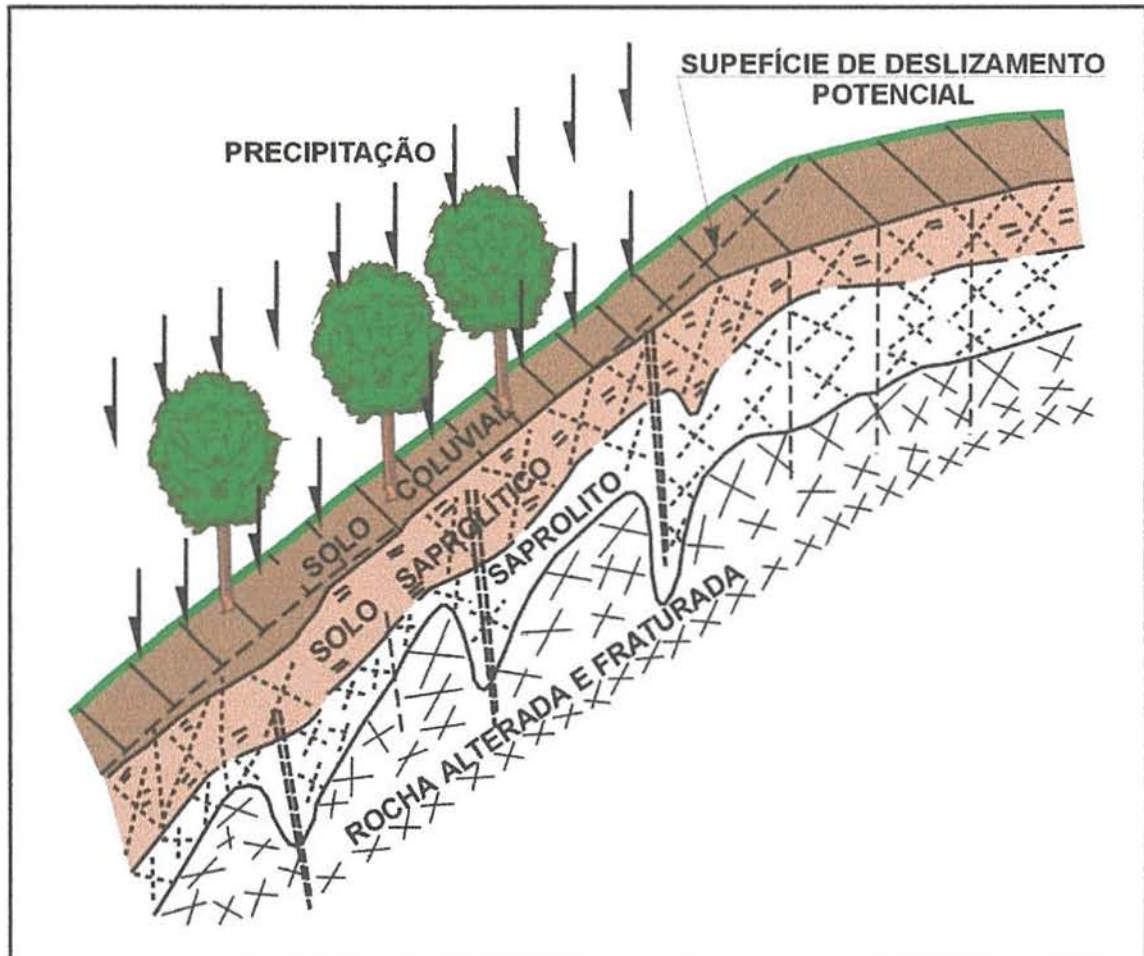


Figura 2.3 - Perfil de solo esquemático dos taludes da Serra do Mar em locais elevados, mostrando o decréscimo da alteração com a profundidade e o posicionamento usual das superfícies de deslizamento (fonte: Wolle e Hachich, 1989).

Segundo Wolle e Hachich (1989), a vegetação local é uma floresta tropical típica, com uma densa ocorrência de árvores e arbustos que protegem o solo da erosão, que interceptam uma significativa porção das águas da chuva, e suas raízes superficiais reforçam o solo particularmente os primeiros 0,5 a 0,8 m do horizonte de solo coluvial. Deere e Patton (1971) também citam a importância da atuação das raízes da vegetação tropical na manutenção da estabilidade dos solos coluviais.

A contínua poluição do ar do Distrito Industrial de Cubatão causou uma degradação severa neste manto vegetal. Chuvas intensas, mas não tão excepcionais, causaram em janeiro de 1985 o maior deslizamento de solo ocorrido na Região de Cubatão: milhares de deslizamentos nos taludes mais severamente afetados pela degradação.

2.2.2 A ENCOSTA DO SOBERBO

Os contínuos movimentos da Encosta do Soberbo, segundo Schilling (1993), no Bairro do Alto da Boa Vista, na Cidade do Rio de Janeiro, têm sido observados desde os escorregamentos catastróficos de 1966 e 1988. A região onde se encontra o escorregamento possui uma ocupação urbana diversificada, com residências do nível de favela até o de casas de alto padrão.

Em janeiro de 1966, após 4 dias de chuva, ocorreu uma grande avalanche. Essa avalanche principiou com a queda de um grande bloco de rocha que se deslocou por gravidade, passando por um muro de arrimo existente a montante da Estrada do Soberbo, destruindo duas casas, atingindo a Estrada de Furnas e destruindo quase totalmente uma fábrica de papéis. O deslizamento provocou o represamento do Rio das Cachoeiras, que desce do Alto da Boa Vista, elevando seu nível original de 8 a 10 m, formando um lago nos terrenos da fábrica. Dois dias depois, ocorreu um escorregamento numa zona, denominada B no estudo de Schilling (1993), quase atingindo a Estrada do Soberbo. Um caminho na região teve seu piso rebaixado cerca de 5 m em uma extensão de 50 m. Poços e jardins foram destruídos e árvores de grande porte chegaram a se deslocar por 20 m sem tombar. Pode-se perceber, portanto, a gravidade de um escorregamento de solo coluvial em uma área urbanizada.

Segundo Schilling (1993), movimento da Encosta do Soberbo continuou ao longo dos anos e afetou uma cortina atirantada construída para restabelecer o tráfego na Estrada do Soberbo.

Em fevereiro de 1988, o Rio de Janeiro foi atingido por chuvas de grandes proporções. Conforme Schilling (1993), a chuva acumulada medida próxima a Encosta do Soberbo, atingiu 449,4 mm, correspondente a um período de recorrência de aproximadamente 50 anos. O registro mensal de 968 mm correspondeu a 44 % da média anual.

Schilling (1993), para organizar seu estudo, dividiu a Encosta do Soberbo em 6 zonas, denominadas “A, B, C, D, E e F”, em função de aspectos locais, topográficos e geológicos observados durante as sondagens. A encosta com suas respectivas zonas estão apresentadas na figuras 2.4. Devido a sua movimentação a encosta foi instrumentada. Nas zonas “C, D e E”, ao longo da encosta instrumentada, existem residências simples localizadas na porção da encosta de maior movimentação.

Na Encosta do Soberbo, essas chuvas intensas produziram escorregamentos adicionais ao longo dos flancos das antigas cicatrizes dos escorregamentos anteriores. No evento de 1988, a cortina da Estrada do Soberbo foi completamente destruída. A instrumentação instalada em 1987 na zona “B”, descrita por Pedrosa *et alii*, citado por Schilling (1993), foi também destruída, assim como as canaletas de drenagem feitas em concreto armado. A zona “A” sofreu um escorregamento abaixo do nível da Estrada do Soberbo, destruindo completamente uma residência de 2 pavimentos recém-construída. Esse escorregamento destruiu, também, parte dessa estrada, tanto na zona “B” como na “A”, aumentando a espessura do solo coluvial ao longo das zonas “B e C”, propiciando que no futuro chuvas de grande intensidade venham a causar novos escorregamentos (Schilling, 1993). Portanto, a região descrita apresenta escorregamento de solos coluviais. Esses escorregamentos apresentam continuidade de movimentos. Esses movimentos são rápidos em períodos de alta intensidade pluviométrica, e lentos em períodos de intensidade normal.

Segundo Schilling (1993), com base no levantamento geológico realizado na região da Encosta do Soberbo, ocorrem na região vários tipos litológicos: metagabro

(Granito Preto Tijuca), granito equigranular (Granito Favela), gnaisse, diabásio maciço, sob a forma de diques cortando a região, e outros. Estruturalmente, destaca-se uma zona de falhamento com direção leste-oeste, que coincide com a “língua” maior do escorregamento.

Os diques de diabásio existentes na encosta foram localizados através de afloramentos e sondagens no talvegue da zona “B”, em trincheiras, num arroio e através das perfurações para a instalação de drenos profundos nas zonas “C, D e E”. Ao executar-se essas sondagens foi observado que os diques funcionavam como pequenas represas para as águas subsuperficiais, contribuindo para a saturação da encosta. As sondagens rotativas identificaram, na parte superior da encosta, a presença de blocos rochosos dentro da massa de solo residual, esse solo residual é originado do Granito Preto Tijuca (quartzo-diorito).

Segundo Schilling (1993), Silveira em 1993 afirmou que o solo coluvial dessa encosta tem origem diversa, constituído por materiais intemperizados, tais como: fragmentos de quartzo-diorito e de diabásio.

Schilling (1993) definiu solo coluvial, no seu trabalho, como sendo a camada formada por solo e/ou fragmentos de rocha localizados no pé e ao longo da encosta transportados das cotas mais altas, pela ação da gravidade e das águas. Este processo de formação tem ação intensa das águas superficiais e subterrâneas que escoam ao longo da encosta, e contribuem para a ocorrência da erosão e dos escorregamentos. Esses escorregamentos deslocam a massa terrosa e rochosa para as cotas mais baixas da encosta.

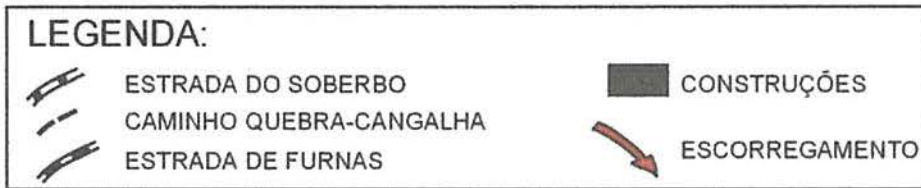
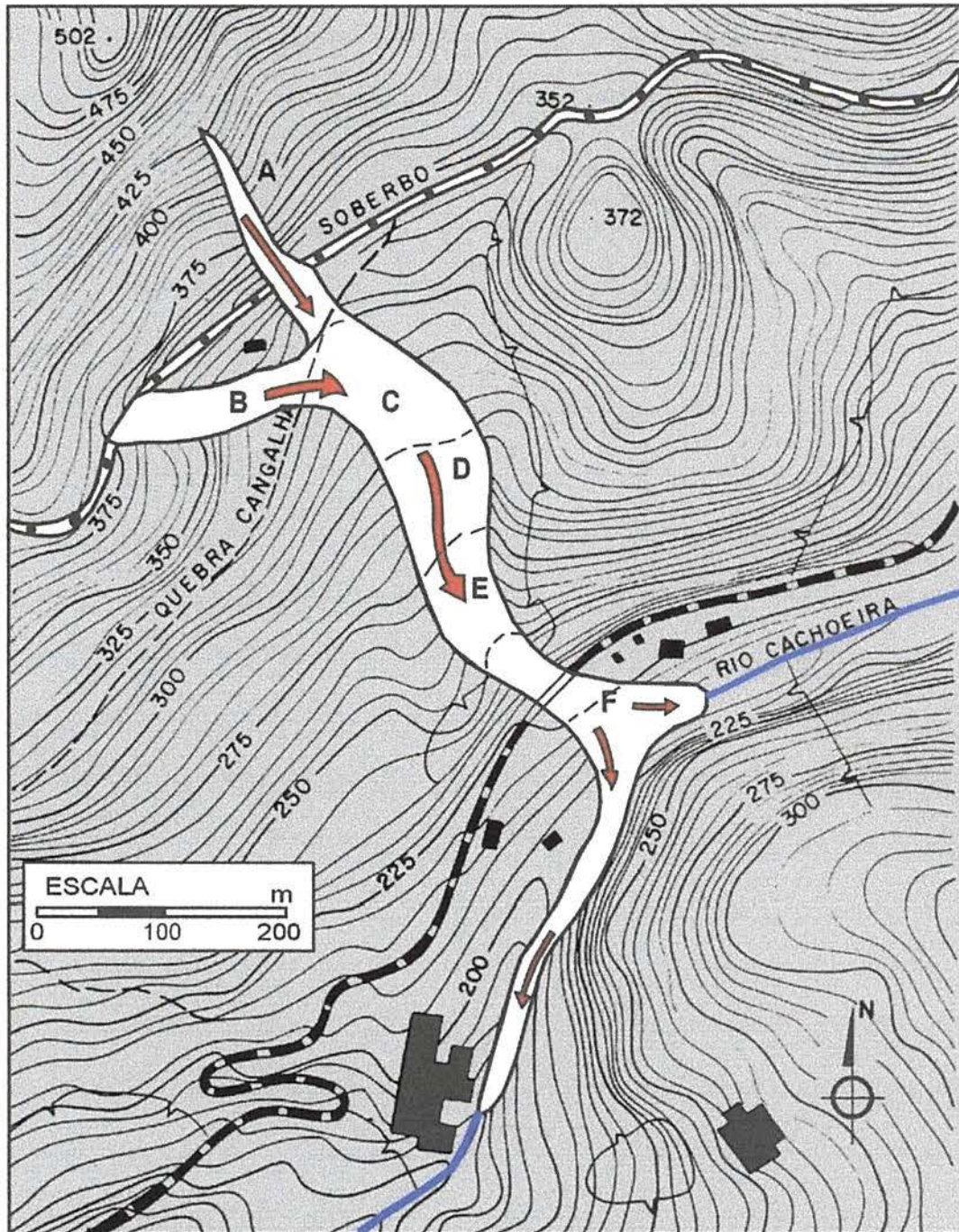


Figura 2.4 - Mapa do Escorregamento da Encosta do Soberbo, com as zonas respectivas, ocorrido em 1966 (fonte: Pedrosa *et al* apresentado por Schilling, 1993).

2.2.3 SOLOS COLUVIAIS NO RIO GRANDE DO SUL

A grande parte da Região Sul do Brasil é coberta por uma seqüência de derrames basálticos conhecidos como Formação Serra Geral. No Estado do Rio Grande do Sul, a espessura total dessa seqüência varia entre 400 e 1200 m. Cada derrame possui litologia e estrutura complexa. As partes superiores e inferiores consistem geralmente de um conjunto irregular de brecha basáltica, basalto vesicular e amigdalóide, com algum material vítreo. A parte central do derrame consiste de basalto maciço com juntas predominantemente verticais (basalto colunar), embora algumas vezes estejam presentes juntas horizontais. Derrames basálticos superpostos são freqüentemente separados por um fino arenito *intertrap* (Bressani, Bica, Pinheiro *et al*, 1997).

Na região próxima à Cidade de Teutônia, no vale do Rio Taquari, foram escavados vales em forma de “U”, na seqüência basáltica, pela erosão fluvial. Esses vales típicos são separados por montes com altura em torno de 500 m. A morfologia de cada monte mostra um número de taludes suaves, correspondendo simplificadaamente ao basalto vesicular e amigdalóide, separados por paredes próximas à vertical, constituídas principalmente de basalto colunar. Esses taludes são geralmente cobertos por solo residual e solo coluvial.

O solo residual consiste de partículas de dimensão argila e partículas de dimensão silte. Sua condutividade hidráulica é baixa quando comparada com a rocha mãe fissurada.

O solo coluvial é altamente variável em composição e granulometria. Consiste de material lixiviado do solo residual com fragmentos de basalto ou arenito na faixa de dimensão do pedregulho ao matacão. Os fragmentos de rocha podem apresentar-se com diferentes estágios de alteração (Bressani, Bica, Pinheiro *et al*, 1997).

Durante a construção de uma rodovia, nas proximidades da Cidade de Teutônia, foi aberto um corte de 4 m de profundidade em um talude de solo coluvial. Esse talude mostrou evidências consideráveis de instabilidade e foi, portanto, estudado por Bressani, Bica, Pinheiro *et al* (1997) com o propósito de compreender o mecanismo de

ruptura de um talude de solo coluvial. No talude de Teutônia, o solo coluvial consiste em uma camada de 4 m de espessura cobrindo o solo residual de basalto. As evidências de instabilidade observadas no talude incluíam a superfície do terreno, disposta em patamares irregulares, fissuras e afloramento d'água. O movimento da massa de solo instável se desenvolvia principalmente após chuvas intensas.

No talude de Teutônia, segundo Bressani, Bica, Pinheiro *et al* (1997), a transição entre o solo coluvial e o residual foi identificada por variações na cor do solo e por variação dos valores de N da sondagem de simples reconhecimento (*standart penetration test* - SPT). O solo coluvial é bruno avermelhado e o solo residual é bruno amarelado. O resultado típico de uma sondagem tipo SPT para o solo coluvial foi de 0 a 5 N(SPT), enquanto para o solo residual o N(SPT) variava entre 5 e 30.

Durante a execução das sondagens SPT, executadas durante a pesquisa de Bressani, Bica, Pinheiro *et al* (1997), foi constatado que para alguns furos o nível d'água se situava a 2 m de profundidade, já para outros furos não foi detectado nível d'água. Contudo, após chuvas intensas, foi observado afloramento d'água na superfície do talude. Esse fato sugere que o nível d'água deve provavelmente coincidir com a superfície do talude durante estações chuvosas.

No solo residual, logo abaixo da camada coluvial, não foi detectado nível d'água, mesmo após chuvas intensas. Esse fato foi observado através da instalação de piezômetros no talude. Essa constatação sugere que no interior da camada coluvial se desenvolvem níveis d'água suspensos. Deere e Patton (1971) fizeram constatações análogas em outros solos coluviais.

O coeficiente de condutividade hidráulica da massa de solo foi determinado, no trabalho de Bressani, Bica, Pinheiro *et al* (1997), através dos furos de sondagem. Constatou-se que a metade superior da camada de solo coluvial possui $k \cong 10^{-5}$ m/s, enquanto a metade inferior dessa mesma camada possuía k entre 10^{-10} e 10^{-9} m/s. A alta condutividade hidráulica, medida próxima a superfície do solo, está provavelmente relacionada a presença de grandes vazios e de fissuras abertas pela movimentação da massa

de solo coluvial; enquanto a baixa condutividade da metade inferior da camada deve estar ligada à migração de partículas de argila da metade superior. A condutividade hidráulica medida no solo residual estava entre 10^{-9} e 10^{-8} m/s.

Os solos coluviais podem se originar em encostas de formações geológicas diversas, em diferentes locais do Brasil como nos Estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul.

Sua ocorrência nas encostas das serras brasileiras está associada à existência de horizontes de solo residual e blocos de rocha originários de um maciço rochoso fraturado. Partículas de solo, pedras e blocos de rocha sã e alterada são transportados por ação da gravidade e da erosão. Esses materiais se depositam na base e ao longo das encostas dessas serras. A percolação de água dentro camada de solo coluvial e sua deposição no seu interior completam a sua caracterização.

A formação do solo coluvial está muitas vezes relacionada com seu modo de ruptura. O movimento lento, quase contínuo, da massa de solo coluvial ao longo da encosta é substituído pelo movimento mais acelerado após períodos chuvosos. Esses movimentos são responsáveis pela acomodação das camadas de solo coluvial na encosta; entretanto, quando é rompido o equilíbrio, o movimento rápido constitui o modo de ruptura do talude.

3 MONITORAÇÃO DO MOVIMENTO DE TALUDES INSTÁVEIS

Segundo Wilson e Mikkelsen (1978), o impacto econômico das rupturas de taludes, nos Estados Unidos, criou uma demanda por melhor instrumentação e levou ao seu uso e aceitação geral. No Brasil, o ônus provocado em obras públicas e privadas ainda não foi devidamente avaliado, mas, quando isso ocorrer, a instrumentação de taludes também alcançará a difusão alcançada nos Estados Unidos.

As rupturas de taludes criam a necessidade de se coletar alguns dados quantitativos para analisar os problemas de instabilidade e para projetar medidas de melhoria da estabilidade (Wilson e Mikkelsen, 1978). São normalmente executados o mapeamento topográfico, o mapeamento geológico, a investigação subsuperficial do solo e da água e os testes de resistência ao cisalhamento em laboratório. Esses dados coletados auxiliam na determinação das causas do deslizamento, do modo de ruptura e das características físicas e de engenharia do solo e da rocha envolvidos. Essa investigação é necessariamente realizada em deslizamentos de solo já desenvolvidos, cujas características podem ser observadas e registradas. Contudo, pequenos movimentos da massa de solo que ocorrem antes ou durante uma ruptura incipiente não são, em geral, visualmente evidentes, de modo que o valor da informação que pode ser obtida na superfície do solo é limitado.

Entretanto, a instrumentação pode fornecer informação valiosa em deslizamentos incipientes, assim como nos completamente desenvolvidos. Nesse aspecto, a instrumentação não possui a intenção de substituir as observações de campo e outros procedimentos de investigação. Pelo contrário, a instrumentação acrescenta outros dados para fornecer informação suplementar e para avisar a iminência de movimentos maiores. Wilson e Mikkelsen (1978) apresentaram situações típicas para a qual vários instrumentos devem ser usados:

- a) Determinar a profundidade e a forma da superfície de ruptura em um deslizamento desenvolvido, de modo que cálculos possam ser feitos para determinar os parâmetros de resistência do solo disponíveis na ruptura e que possam ser projetados tratamentos de melhoria da estabilidade (retroanálise);
- b) Determinar os movimentos absolutos verticais e laterais dentro da massa deslizante;
- c) Determinar a velocidade de deslizamento, os movimentos em aceleração ou desaceleração, e desse modo alertar para perigos iminentes;
- d) Monitorar a atividade de taludes naturais ou de corte no limite da estabilidade e os efeitos das atividades de construção ou da precipitação sobre os mesmos;
- e) Monitorar o nível d'água ou a pressão neutra normalmente associada com a atividade de deslizamento para que seja possível executar uma análise em tensões efetivas;
- f) Fornecer leitura digital remota ou sistema de alarme remoto que possa avisar de possíveis perigos;
- g) Monitorar e avaliar a efetividade de várias medidas de controle.

Na última situação, atividades recuperadoras são freqüentemente realizadas, em tratamentos para melhoria da estabilidade, através do planejamento e monitoramento durante a construção. Por exemplo, a drenagem pode ser inicialmente instalada e seus efeitos monitorados para determinar se uma contenção projetada para o talude é realmente necessária.

3.1 PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO

Para uma instrumentação eficiente e econômica, Wilson e Mikkelsen (1978) comentam que é necessário um plano adequado antes que um deslizamento específico seja instrumentado. Os passos para a definição desse plano são os seguintes:

- a) Determinar os tipos de medições requeridas;

- b) Selecionar os tipos específicos de instrumentos mais adequados para fazer as medições requeridas;
- c) Planejar a locação, o número e a profundidade da instrumentação a ser instalada;
- d) Desenvolver técnicas de registro de leituras.

Inicialmente, o processo de planejamento requer o desenvolvimento de hipóteses sobre as causas do deslizamento e os prováveis limites da profundidade e outras fronteiras do movimento. O reconhecimento da área, o estudo da geologia, a revisão dos registros de precipitação e observação das feições topográficas, especialmente mudanças topográficas recentes, freqüentemente fornecerão informações para a formulação dessas hipóteses. Infelizmente, nenhum deslizamento é semelhante a outro em todos os detalhes, e somente a experiência sem a aplicação de julgamento pode levar a conceitos errados (Wilson e Mikkelsen, 1978).

Um sistema de instrumentação na qual os instrumentos não se estendem abaixo da zona de movimentação, ou estão instalados em locações erradas, ou ainda são inadequados, constitui-se um gasto de tempo e dinheiro. Perda de tempo pode significar que os tratamentos corretivos podem começar muito tarde para salvar um projeto (Wilson e Mikkelsen, 1978). Na instalação de tubos guias para inclinômetro, é altamente desejável que os tubos guias se estendam abaixo da zona de movimentação, conforme é explanado no item 3.6.

3.2 TIPOS DE MEDIÇÕES REQUERIDAS

Wilson e Mikkelsen (1978) definiram que em um deslizamento de solo a magnitude, a velocidade e a distribuição dos deslocamentos são geralmente as mais importantes medidas requeridas. Igualmente importante em muitos problemas de deslizamento, contudo, são as medidas de pressão neutra dentro da área em movimento, particularmente em sistemas estratificados nos quais algum excesso de pressão hidrostática pode existir entre as camadas.

Se a profundidade do deslizamento é prontamente aparente em observações visuais, medições superficiais podem ser suficientes para obter a velocidade do movimento. Essas medições superficiais devem se estender ao longo do limite superior da área em movimento visualizada, tal que a possível extensão de avanço das trincas possa ser monitorada. As medições verticais e horizontais do movimento da superfície do solo em vários locais dentro da área deslizante devem ser obtidas. Compensações verticais, largura das trincas e elevação do pé do deslizamento devem ser monitorados. A direção do movimento pode frequentemente ser inferida do padrão do trincamento.

Se a profundidade e espessura da zona do movimento não são aparentes, inclinômetros, ou instrumentos similares que possam detectar o movimento em profundidade, devem ser usados. A pressão neutra na superfície de deslizamento ou no entorno, também deve ser medida para permitir que seja feita uma análise em tensões efetivas. A medição da pressão neutra possibilita determinar a adequação de um sistema de drenagem (Wilson e Mikkelsen, 1978).

3.3 SELEÇÃO DOS INSTRUMENTOS

Muitos tipos e modelos de instrumentos são disponíveis para medir as mudanças nas condições do deslizamento de uma massa de solo. Instrumentos têm sido desenvolvidos para medir movimentos verticais e horizontais na massa de solo, pressão neutra, tensões e deformações *in situ*, respostas dinâmicas e muitos outros parâmetros. Contudo, na maioria dos problemas de deslizamento, a medida do movimento horizontal da massa de solo ou rocha e a medida da pressão neutra são de correlação básica (Wilson e Mikkelsen, 1978).

A confiabilidade é característica mais desejável quando se selecionam instrumentos (Dunncliff, 1988). A simplicidade máxima é inerente a confiabilidade. Os transdutores, em geral, podem ser colocados na seguinte ordem decrescente de simplicidade e confiabilidade:

- a) óticos;
- b) mecânicos;
- c) hidráulicos;
- d) pneumáticos;
- e) elétricos.

O baixo custo do instrumento não deve dirigir a seleção. O instrumento mais acessível não resulta no custo total mínimo. Na avaliação econômica dos instrumentos alternativos, o custo global de procura, calibração, instalação, manutenção, monitoramento e processamento de dados deve ser comparado (Dunnicliff, 1988).

Segundo Dunnicliff (1988), é responsabilidade dos usuários desenvolver um nível adequado de compreensão dos instrumentos que eles selecionam. Esses usuários freqüentemente se beneficiam da discussão da aplicação desses instrumentos com engenheiros geotécnicos ou geólogos com os fabricantes antes de selecioná-los.

Os instrumentos devem possuir um bom desempenho passado registrado e devem ter sempre a máxima durabilidade no meio ambiente instalado. O meio ambiente é severo para os instrumentos geotécnicos, e, infelizmente, alguns instrumentos não são suficientemente bem projetados para uma operação confiável em determinado meio (Dunnicliff, 1988).

Quando se utilizam certos instrumentos, se uma leitura pode ser obtida, essa leitura é necessariamente correta. Outros tipos de instrumentos, entretanto, possuem a característica da calibração poder ser verificada após a instalação. Essas duas características reunidas em um só instrumento seriam altamente desejáveis.

A seleção dos instrumentos deve reconhecer as limitações de pessoal disponível, tanto em quantidade quanto em experiência. Outras características da instrumentação, que devem ser avaliadas para a seleção, são uma boa conformação dos instrumentos, uma mínima interferência com a construção e mínima dificuldade de acesso ao local durante a instalação e leitura do instrumento (Dunnicliff, 1988).

A necessidade de um sistema automático de aquisição de dados deve ser determinada. As leituras de saída dos instrumentos devem ser selecionadas considerando o planejamento da frequência e da duração de cada leitura. Automação e sofisticação desnecessárias devem ser evitadas (Dunnicliff, 1988).

A seleção dos instrumentos deve considerar tanto as condições e necessidades durante a construção e a longo prazo. O critério para as duas fases pode ser diferente e pode tornar necessária a seleção de dois diferentes métodos de monitoração (Dunnicliff, 1988).

Alta sensibilidade de um instrumento é normalmente um pré-requisito quando o desempenho do projeto é monitorado durante a construção. Porque é, frequentemente, a velocidade de variação de uma grandeza um dado melhor do que o valor absoluto dessa grandeza para fornecer a chave da adequada interpretação (Wilson e Mikkelsen, 1978).

Retornando a questão de instrumentação de taludes, se o movimento é sabido ser ao longo de um plano de cisalhamento bem definido, tal como um plano de estratificação ou fraqueza, simples indicadores de superfície de ruptura poderão ser suficientes para determinar a profundidade do movimento. Se o movimento é grande e rápido, a precisão não é um requisito essencial e, portanto, inclinômetros relativamente expeditos podem ser suficientes. Quando a velocidade do movimento é pequena e a profundidade e distribuição não é conhecida, é requerida instrumentação mais precisa. Inclinômetros precisos, cuidadosamente instalados, são os melhores nessas instâncias, embora possam existir casos nos quais extensômetros ou medidores de deformação possam ser usados com vantagem (Wilson e Mikkelsen, 1978).

O Piezômetro de Casagrande é o mais usado em planos gerais como instrumento de medida de pressão neutra. O Piezômetro da Casagrande ou piezômetro de tubo aberto consiste em um tubo, em PVC por exemplo, dotado de um filtro na sua extremidade inferior. O piezômetro é colocado em um furo de sondagem de forma que o filtro se posicione na profundidade onde se deseja medir a pressão neutra. O filtro permite a

passagem da água intersticial para dentro do tubo, mas retém o solo instrumentado. No entorno desse filtro o furo é preenchido com areia lavada, e logo acima do filtro o é criado um selo de argila impermeável no furo. A tendência natural é a água entrar no piezômetro e subir até uma altura correspondente a pressão neutra existente no ponto de medida.

Se o solo instrumentado é fino, argiloso, a resposta inicial do Piezômetro de Casagrande pode ser lenta, pois é função da permeabilidade do solo. Os piezômetros de resposta rápida são vantajosos nesses solos. Por esse motivo, piezômetros pneumáticos ou elétricos podem ser preferidos, particularmente em solos argilosos, pois são mais independentes da permeabilidade do solo para fornecer uma resposta mais rápida. Evidentemente, os piezômetros pneumáticos ou elétricos necessitam ser calibrados.

Segundo Wilson e Mikkelsen (1978), os tipos de instrumentos, o *layout* e os esquemas de monitoramento são geralmente determinados pelas necessidades específicas do projeto. Muitos itens básicos, contudo, devem ser extensamente avaliados para qualquer sistema. Os instrumentos devem ser confiáveis, resistentes e capazes de funcionar por longos períodos de tempo sem reparo ou troca. Devem, também, ser capazes de responder rápida e precisamente a mudanças, tal que uma imagem verdadeira dos eventos possa ser mantida em todas às vezes, durante todo o tempo.

Já que a maioria das medições é relativa, uma base estável ou uma referência de nível (*datum*) deve ser providenciada de modo que possam ser determinados movimentos absolutos (Wilson e Mikkelsen, 1978).

3.4 SELEÇÃO DA LOCAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

A seleção da locação dos instrumentos, conforme Dunnicliff (1988), deve refletir o comportamento previsto e deve ser compatível com o método de análise que será posteriormente utilizado durante a interpretação dos dados.

Dunnicliff (1988) sugere uma aproximação prática para selecionar a locação de instrumentos compreendendo 3 passos. Primeiro, as zonas de particular importância são identificadas como zonas estruturalmente fracas, zonas altamente carregadas (tensionadas) ou zonas onde as mais elevadas pressões neutras são previstas, e a instrumentação apropriada é locada.

Se não existem zonas como essas, ou se os instrumentos são também locados em outras posições, um segundo passo é feito. Uma seleção é feita de zonas, normalmente seções transversais, onde o comportamento previsto é considerado representativo do comportamento global. Quando se consideram que essas zonas são representativas, as variações tanto em geologia como em procedimentos construtivos devem ser consideradas. Essas seções transversais são, então, denominadas seções instrumentadas primárias, e os instrumentos são locados para fornecer dados de desempenho compreensível. Devem existir comumente ao menos duas seções primárias.

Terceiro, porque a seleção das zonas representativas pode estar incorreta, a instrumentação deve ser instalada em um número de seções secundárias de instrumentação, para servir como índices comparativos de comportamento. Os instrumentos dessas seções secundárias devem ser tão simples quanto possível e devem, também, ser instalados nas seções primárias de forma que comparações possam ser feitas (Dunnicliff, 1988).

Segundo Wilson e Mikkelsen (1978), é particularmente verdadeiro que instrumentos que registram pressão neutra são específicos para medir pressão em uma zona definida de fraqueza ou potencial instabilidade.

A locação deve geralmente ser selecionada de tal forma que os dados possam ser obtidos tão cedo quanto possível, durante o processo construtivo. Devido a inerente variação dos solos e rochas, é usualmente imprudente confiar em um único instrumento com indicador de desempenho (Dunnicliff, 1988).

Em locais possíveis, devem ser feitas locações para fornecer conferências cruzadas entre tipos de instrumentos. Se, por exemplo, inclinômetros verticais e

extensômetros fixos horizontais são instalados próximos uns aos outros, na mesma seção transversal no solo, uma ancoragem de extensômetro deve ser instalada próximo ao tubo guia do inclinômetro. Contudo, cuidado deve ser tomado para evitar criar zonas de fraqueza por excessiva concentração de instrumentos agrupados.

Embora a locação dos instrumentos deva ser comumente mostrada no planejamento, a flexibilidade deve ser mantida de modo que as locações possam ser mudadas com novas informações que se tornaram disponíveis durante a construção. Desse modo devem ser requeridas especificações flexíveis de instalação de instrumentos (Dunnicliff, 1988).

Concluindo, a locação dos instrumentos requer um completo reconhecimento das condições geológicas e subsuperficiais do talude se quiserem ser obtidos dados significativos (Wilson e Mikkelsen, 1978).

3.5 LEVANTAMENTOS DE SUPERFÍCIE

Em uma área de deslizamento ativo, segundo Wilson e Mikkelsen (1978), movimentos superficiais são normalmente monitorados para determinar a extensão da atividade de deslizamento e a velocidade do movimento.

Levantamentos com instrumentos óticos e medidas a trena são utilizados para determinar movimentos laterais e verticais. *Bench marks* e estações de trânsito, localizados em solo estável, fornecem a base a partir da qual movimentos subseqüentes de marcos superficiais podem ser determinados oticamente e por medidas a trena.

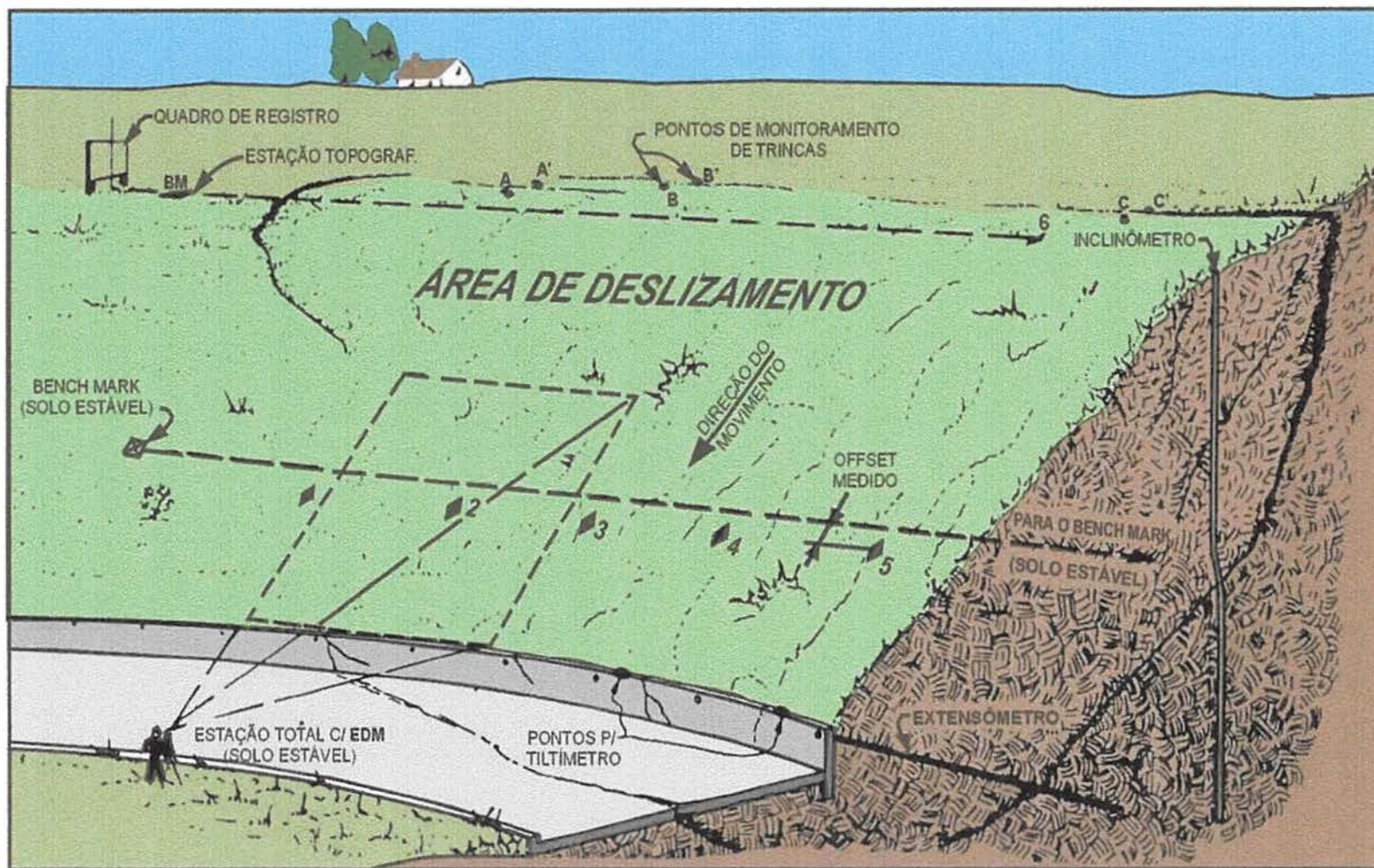


Figura 3.1 - Monitoração do movimento em um talude em deslizamento típico (fonte: Wilson e Mikkelsen, 1978)

Como é mostrado na figura 3.1, linhas de trânsito podem ser estabelecidas de forma que os deslocamentos verticais e horizontais no centro e no pé do deslizamento possam ser observados. Quando uma trinca de tração se abre acima do topo do deslizamento, simples medições diárias através da trinca podem ser feitas entre dois marcos cravados no solo. Em muitos casos o limite externo do movimento da massa de solo não é conhecido, e estabelecer instrumentos instalados em solo estável pode ser um problema.

Embora o levantamento citado acima possa ser considerado um levantamento convencional, em situações específicas levantamentos mais complexos podem definir a área do movimento. Medições mais acuradas podem ser requeridas em muitos casos. Conforme citam Wilson e Mikkelsen (1978), Terzaghi estabeleceu que “se um deslizamento ocorre como uma surpresa para o observador visual, poderia ser mais exato dizer que o observador falhou em detectar os fenômenos que precederam o deslizamento”. A constatação é que o menor movimento possível deveria ser medido no momento mais cedo possível.

A detecção de pequenos movimentos superficiais, quando as trincas não estão aparentes, requer um observador treinado (Wilson e Mikkelsen, 1978). Se a superfície do solo está coberta de blocos de rocha, ou se existe uma concentração de blocos, espriamentos horizontais resultarão em instabilidade local de blocos individuais, de modo que caminhando sobre o talude se tem uma noção de insegurança. Blocos de rocha virados podem ser detectados pela mudança na coloração ou na alteração superficial. Árvores inclinadas na base, mas mudando para um tronco vertical um metro ou mais acima do solo podem indicar antigos movimentos de deslizamentos. Troncos inclinados, mas retos indicam movimento recentes. Trincas cobertas por cima com folhas ou detritos superficiais podem ser detectadas caminhando sobre a área e percebendo a firmeza ou suporte do solo. Frequentemente animais evitam pastar em uma área de deslizamento potencial, porque há incerteza de suporte ou trincas ocultas. Pequenas aberturas sobre a parte inferior do talude, próximas de estruturas ou troncos de árvore, podem indicar *creep*. Linhas excessivamente fletidas ou desalinhadas de moirões de cercas ou postes de eletricidade são excelentes indicadores de movimento do solo. Esses movimentos, quando cuidadosamente monitorados servem como uma ferramenta importante na definição de risco potencial de estruturas, residentes próximos e o público (Wilson e Mikkelsen, 1978).

3.5.1 OUTROS TIPOS DE LEVANTAMENTO DE SUPERFÍCIE

Existem algumas técnicas de levantamento topográfico se desenvolvendo rapidamente, e essas técnicas, sem dúvida, terão seu uso aumentado em instrumentações de campo. Algumas, como *lasers* e estações totais com medidores eletrônicos de distância, já são de uso extensivo.

Segundo Wilson e Mikkelsen (1978), as estações totais com medidores eletrônicos de distância (EDM) têm modificado as práticas de levantamento topográfico mais do que qualquer coisa nas últimas décadas. Estes instrumentos têm provado ser particularmente adequados para uso em terrenos acidentados. O seu desempenho é mais acurado e mais rápido do que os levantamentos convencionais e esses instrumentos requerem menor número de pessoas para que o levantamento seja executado. Os medidores eletrônicos de distância podem ser usados eficientemente sob condições ideais para distâncias tão pequenas quanto 20 m e tão longas como 3 km. Instrumentos maiores usando onda luminosa ou microondas podem ser usados a distâncias maiores. A exatidão do EDM é influenciada pelo clima e as condições atmosféricas.

Os medidores eletrônicos de distância podem ser usados para monitorar grandes deslizamentos com grandes movimentos e fornecem um modo rápido para levantar muitos pontos sobre uma massa de solo de um simples local facilmente acessível.

Os instrumentos a *laser* já são largamente usados para local alinhamentos. Eles são adequados para fixar uma linha de referência para medidas de movimentação de marcos superficiais. *Lasers* são também usados em alguns instrumentos com medidores eletrônicos de distância.

3.5.2 MONITORAMENTO DE TRINCAS

O mapeamento geotécnico é considerado, muitas vezes, a solução adequada para descrever uma área afetada por um deslizamento (Wilson e Mikkelsen, 1978).

As medições de deslocamentos qualitativas simples podem fornecer conhecimento da atividade. Movimentos de trincas, particularmente aqueles talude acima e talude abaixo de zonas bem definidas de movimento, fornecem respostas para o aumento de volume associado a muitos deslizamentos. Por isso é desejável monitorar a mudança na largura, bem como a mudança de elevação, através das trincas. Isso pode facilmente ser feito por medidas diretas de eixos colocados em ambos os lados de uma trinca.

Instrumentos simples, grosseiros, podem ser construídos no campo para fornecer uma indicação mais exata e contínua do movimento de uma trinca. Medidas periódicas a trena podem detectar movimentos e velocidades não visualmente aparentes.

Um sistema de monitoramento de trincas, conforme Wilson e Mikkelsen (1978), pode ser utilizado nas zonas de cisalhamento ao longo das laterais da área de deslizamento. Estações topográficas de 3 pontos são freqüentemente utilizadas para esses monitoramentos. Contudo, devido à grande largura da área de cisalhamento, esses instrumentos simples podem não ser satisfatórios.

3.5.3 TILTÍMETROS

Os tiltímetros, segundo Dunnicliff (1988), são utilizados para monitorar a mudança de inclinação (rotação) de pontos situados na superfície do solo ou em uma estrutura. Um tiltímetro consiste em um transdutor sensível à gravidade com um invólucro apropriado. Esses invólucros são disponíveis para a instalação tanto sobre como abaixo da superfície do solo ou de uma estrutura. Versões superficiais podem tanto ser fixas no local ou dispostas como um instrumento portátil. As versões subsuperficiais são comumente fixas no local dentro de furos de sondagem.

Wilson e Mikkelsen (1978) comentam que os tiltímetros podem ser usados para detectar rotação de um ponto superficial, mas este instrumento é relativamente novo e possui uso limitado. Esses instrumentos têm sido usados principalmente para monitorar movimentos de taludes em escavações de minas e em cortes rodoviários ou ferroviários, mas eles possuem aplicação potencial em áreas de deslizamento. Estes instrumentos podem ser

usados em qualquer área onde o modo de ruptura da massa de solo ou rocha espera-se que contenha uma componente de rotação. Suas vantagens são o baixo peso, a operação simples e o fato de serem compactos. Conforme Dunnicliff (1988), os tiltímetros também podem ser utilizados para monitorar a inclinação de cortinas de contenção em taludes.

Em muitos casos, os transdutores sensíveis à gravidade são dotados de um pêndulo que se movimenta de acordo com a inclinação do instrumento, ou seja, o transdutor se movimenta devido à força da gravidade. O transdutor de inclinação desenvolvido nesse trabalho para um inclinômetro pode ser facilmente adaptado para uso em um tiltímetro.

3.6 MONITORAMENTO DE DEFORMAÇÕES SUBSUPERFICIAIS

No estudo de um talude em ruptura, quando a velocidade do movimento é lenta e sua profundidade e distribuição não são conhecidas, conforme comentado no item 3.3, para se definir esse movimento são necessárias medições precisas de deformações subsuperficiais. Esse tipo de ruptura é comum em taludes de solos coluviais. A inclinometria é um método consagrado de medição precisa de deformações subsuperficiais.

O inclinômetro é um instrumento que mede a variação da inclinação de um tubo colocado dentro de um furo de sondagem (Wilson e Mikkelsen, 1978). Desse modo, o inclinômetro permite a determinação da distribuição do movimento lateral em função da profundidade abaixo da superfície e em função do tempo. A aplicação dos inclinômetros a deslizamentos de solos e rochas é evidente; sendo, portanto, útil para definir superfícies de deslizamento ou zonas de movimento em relação a zonas estáveis.

Nos deslizamentos, tubos guias de inclinômetro são normalmente instalados em furos de sondagem de exploração estendidos através dos solos e rochas com suspeita de movimentação. Esses tubos possuem sua parte inferior preferivelmente assentada dentro de materiais que são assumidos como estáveis (Wilson e Mikkelsen 1978).

O sistema inclinômetro, segundo Dunnycliff (1988), tem quatro componentes principais:

- a) Um tubo guia instalado permanentemente;
- b) Um torpedo portátil contendo um transdutor sensível à gravidade;
- c) Uma unidade de leitura portátil;
- d) Um cabo elétrico graduado que conecta o torpedo à unidade de leitura, servindo de sustentação à descida do torpedo no tubo guia.

O torpedo do inclinômetro contém um transdutor sensível à gravidade, dotado de um pêndulo, projetado para medir inclinações do tubo guia em relação à vertical. Esse tubo guia é instalado em um furo com alinhamento próximo à vertical, de forma que o inclinômetro forneça dados para definir deformações subsuperficiais horizontais (Dunnycliff, 1988).

Para ser utilizado, o torpedo do inclinômetro é baixado e levantado dentro do tubo guia suspenso pelo cabo cuidadosamente marcado. Suas rodas são orientadas pelas ranhuras do tubo guia, como mostra a figura 3.2. O registro da mudança de inclinação ao longo do tubo guia é monitorado na superfície. Leituras são tomadas em incrementos fixos, comumente iguais, ao longo de toda a profundidade do tubo guia (Wilson e Mikkelsen, 1978).

A maioria dos inclinômetros mede a inclinação do tubo guia em dois planos mutuamente perpendiculares quase verticais. Desse modo, as componentes horizontais do movimento, ambas transversal e paralela a qualquer direção assumida de deslizamento, podem ser computadas das medidas do inclinômetro.

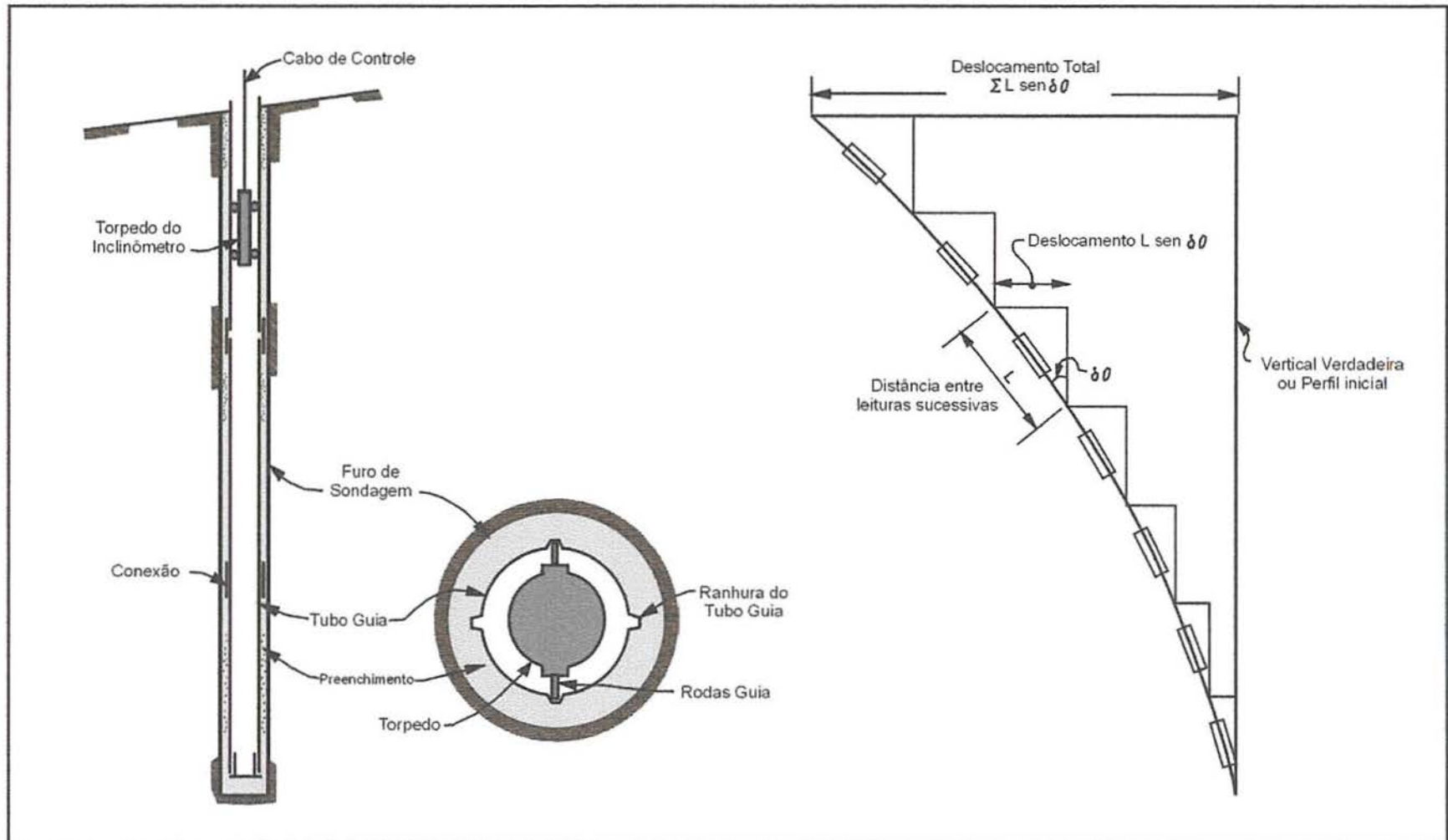


Figura 3.2. Princípio de operação de um inclinômetro (fonte: Wilson e Mikkelsen, 1978).

A função do inclinômetro é detectar a mudança na inclinação do tubo guia de sua posição original de instalação próxima a vertical. Leituras tomadas a profundidades regulares preestabelecidas dentro do tubo guia permitem que sejam determinadas as variações na inclinação em diversos pontos. A integração dessas variações da inclinação entre quaisquer dois pontos fornece a deflexão relativa entre esses pontos (ver fig. 3.2). Repetindo essas medidas periodicamente obtêm-se dados sobre a localização, magnitude, direção e velocidade do movimento do tubo guia no furo de sondagem. A integração é normalmente executada a partir do fundo do furo, desde que o fundo seja assumido fixo em posição e inclinação (Wilson e Mikkelsen, 1978). Mais detalhes são apresentados no capítulo 4.

Esta é a situação mais comum, entretanto existem inclinômetros especiais para serem instalados em tubos guias horizontais e inclinados que estão fora do escopo desse trabalho.

3.7 O USO DE INSTRUMENTAÇÃO DE CAMPO EM TALUDES

O uso de instrumentação de campo para o monitoramento de taludes instáveis é aqui discutido através de uma breve descrição de casos históricos. O objetivo é caracterizar os tipos de instrumentos mais utilizados no acompanhamento desses fenômenos de ruptura em taludes e dar exemplo do uso de inclinômetros. Os casos aqui apresentados são exemplos de instrumentação de taludes em regiões de clima temperado, portanto apresentando solos de climas temperados.

Cooper e Grant (1989) estudaram e implementaram um sistema de instrumentação para um corte experimental no sul da Inglaterra. Uma escavação foi feita em argila rija. Nesta escavação uma das faces tinha a inclinação de 1:2 (H:V). Um intenso sistema de instrumentação foi instalado para monitorar o comportamento deste talude de 9 m de altura. Este talude chegou a ruptura por excesso de pressão neutra. A instrumentação utilizada neste estudo foi projetada para situações de ruptura particulares e não para monitoração de comportamentos rotineiros.

A instrumentação projetada visou responder a três requisitos principais:

a) A instrumentação deveria fornecer um registro detalhado não usual da condição do talude em todos os estágios do experimento. O principal objetivo do desenvolvimento do projeto foi fornecer um caso registrado tão detalhado quanto possível, com a expectativa que tal detalhe poderia aumentar o conhecimento do mecanismo de ruptura de taludes, mostrando o comportamento de taludes rompidos em geral e cortes em argilas rijas em particular.

b) A instrumentação deveria fornecer informações úteis sobre deformações e deslocamentos antes da ruptura. O tópico de particular interesse foi o desenvolvimento do mecanismo de ruptura progressiva.

c) O sistema deveria produzir resultados durante e, se possível, além do evento de ruptura final.

A área estudada por Cooper e Grant (1989) tinha 25 m de largura e o corte, tinha 9 m de altura. A área instrumentada se estendeu por 18 m para trás da crista do talude e por 6 m para frente do pé. Foram utilizados os seguintes instrumentos:

- piezômetros pneumáticos;
- piezômetros de corda vibrante;
- inclinômetros convencionais;
- inclinômetros fixos;
- extensômetros de fio;
- indicadores de nível d'água;
- indicadores de superfície de ruptura.

O sistema era composto por uma média de um instrumento de monitoração para cada 8,6 m² de área. Esse nível de instrumentação não é comum. As dimensões da maioria dos deslizamentos naturais submetidos a estudo detalhado geralmente levam a uma cobertura esparsa da ordem de 1/30 da intensidade deste caso.

A decisão de instalar um grande número de piezômetros foi uma consequência direta do método proposto para induzir a ruptura. Como o talude foi rompido por acréscimo de pressão neutra, o regime de fluxo de água existente no solo, inferido de investigações prévias, não foi aplicável, nem foram aceitáveis modificações baseadas em um pequeno número de leituras de piezômetro. Era necessário fornecer cobertura suficiente para definir precisamente o regime total de pressão neutra dentro do talude.

A cobertura feita pelos inclinômetros foi projetada por Cooper e Grant (1989) para fornecer leituras de deslocamento detalhadas através do corpo do talude, e durante o completo período de pré-ruptura. Um torpedo de inclinômetro convencional foi usado para monitorar deslocamentos em 12 tubos guias. Isso forneceu uma boa cobertura espacial, enquanto os inclinômetros fixos (duas cadeias perfazendo um total de 20 sensores) forneceram continuamente perfis do movimento em profundidade em dois locais chave.

As velocidades do movimento e das deformações dentro da massa de solo em ruptura foram também de interesse do monitoramento e foi decidido que informações úteis poderiam ser obtidas usando extensômetros de fio montados superficialmente.

Os piezômetros de corda vibrante, os inclinômetros fixos e os extensômetros de fio foram lidos continuamente. Cooper e Grant (1989) foram muito cuidadosos em projetar um sistema que tivesse flexibilidade considerável em procedimentos de leitura. Era essencial que leituras pudessem ainda ser tomadas mesmo que algum componente do sistema de aquisição de dados falhasse no momento crítico.

Barton e Coles (1984) estudaram dois casos de deslizamento de taludes também no sul da Inglaterra. O primeiro local era uma área residencial. A inclinação média do talude era de 11°. O perfil do local consistia de um leito de argila laminada, com camadas muito finas. No estrato superior existia um solo coluvial constituído de detritos oriundos do leito de argila. Por sobre essa camada existia um aterro. O deslizamento estava confinado ao estrato superior do solo coluvial.

Foram instalados neste talude tubos guias de inclinômetro e piezômetros de tubo aberto. Foi utilizado um inclinômetro com servo-acelerômetro se movimentando em um tubo guia de alumínio. O deslocamento em relação à profundidade do perfil confirmou a profundidade do deslizamento. Os maiores movimentos do deslizamento ocorreram no inverno, possuíam uma velocidade de pico de 0,8 mm/dia e foram registrados durante um mês. A estabilização do talude foi alcançada com a instalação de drenos de trincheira.

O segundo local estudado por Barton e Coles (1984) pertence à costa de falésias de um afloramento de argilito no sul da Inglaterra. A instabilidade era resultado da erosão marinha no pé do talude. Foram desenvolvidos estudos para determinar o padrão de degradação do talude e monitorar a sua velocidade de movimentação.

Tubos guias de inclinômetro foram instalados e, também, simples indicadores de superfície de ruptura para localizar as superfícies cisalhantes. A atividade de degradação era tal, que o tempo de utilização de um inclinômetro seria muito breve para obter velocidades de movimentação confiáveis. Marcos superficiais, então, foram instalados, sendo periodicamente monitorados usando uma estação total de topografia de precisão (Barton e Coles 1984).

Bonnard (1984) estudou um antigo escorregamento nos Pré-Alpes suíços. O primeiro objetivo do estudo foi determinar a distribuição espacial das velocidades do deslizamento e suas variações no tempo.

Foram executados dois furos na zona crítica do escorregamento, separando a parte elevada e calma da inferior e rápida. Esses dois furos de 66 e 79 m de profundidade foram equipados com tubos guias de inclinômetro e por vários tubos de piezômetros. O primeiro furo encontrou o substrato rochoso a 55,8 m de profundidade, enquanto o segundo não encontrou o fundo da antiga massa de solo deslizada, contudo ele cruzou a atual superfície de ruptura.

As medições de inclinômetro foram feitas através de um protótipo de um sistema de aquisição de dados. A posição da superfície de ruptura ativa dentro da massa de

solo foi identificada 3 semanas após a leitura inicial. No primeiro furo, a única superfície de ruptura estava situada aproximadamente a 43 m de profundidade, enquanto que no segundo furo, a superfície estava localizada entre 56 e 59 m. A velocidade média anual do movimento obtido durante a primavera de 1982 alcançou 23 cm/ano e 13 cm/ano nos dois furos respectivamente. É interessante observar que não apareceu nenhuma superfície secundária de ruptura. Por outro lado, a superfície de deslizamento ativa não corresponde, em ambos os furos, ao fundo do deslizamento histórico que era na superfície do leito de rocha. O azimute médio do movimento foi de 144° no primeiro furo e 91° no segundo, essa diferença confirma o espraiamento do deslizamento na parte inferior.

Os tubos guias embutidos na zona estável, cujos comprimentos alcançaram 23 m em ambos os furos, mostraram um desvio máximo da vertical de 4,2 e 4,3 mm respectivamente. Esses resultados realmente baixos confirmaram a confiabilidade das medições dos inclinômetros (Bonnard, 1984).

Em ambos os furos, Bonnard (1984) monitorou os níveis piezométricos utilizando o tubo guia do inclinômetro. No primeiro furo, o segmento de tubo guia de 3 m de extensão, colocado próximo ao contato entre a massa de solo deslizante e o leito de rocha, foi perfurado. Foi feito um grande número de pequenos furos de 2 mm de diâmetro alinhados irregularmente. O preenchimento ao longo do tubo, normalmente feito com calda de cimento, foi substituído por areia de granulometria adequada, isolada do estágio seguinte de calda de cimento por um selo de bentonita. Na massa de solo deslizante, duas zonas úmidas, detectadas durante a perfuração, foram equipadas com micropiezômetros, estes piezômetros eram tubos abertos com diâmetro interno de 8 mm, colados aos tubos guia, e possuindo na sua parte inferior um filtro. O mesmo tratamento citado anteriormente foi dado ao preenchimento ao longo do tubo.

No segundo furo, um micropiezômetro também foi colocado durante a instalação do tubo guia. Mais tarde, quando o torpedo do inclinômetro não podia mais ser baixado através da zona da superfície de ruptura, o tubo foi detonado nesta profundidade com uma pequena carga explosiva, sendo o tubo guia então transformado em piezômetro de tubo aberto fornecendo os níveis de pressão neutra na superfície de ruptura.

Um registro contínuo do nível d'água dentro do tubo guia do primeiro furo foi armazenado por uma leitora automática de dados. Os resultados correspondentes mostraram pequena variação, apesar das severas mudanças nas condições climatológicas (Bonnard, 1984).

A aplicação de inclinometria para o monitoramento de deformações subsuperficiais em taludes instáveis é um procedimento adequado de instrumentação. Associados aos inclinômetros são, quase sempre, instalados piezômetros para avaliação das pressões neutras atuantes na massa de solo instabilizada. Entretanto, em função de grandes velocidades de movimentação de um talude, inclinômetros podem não se aplicar a todos os casos de monitoramento de deformações.

O uso do mesmo furo de sondagem para monitorar deformações subsuperficiais e pressão neutra é possível, inclusive utilizando o próprio tubo guia como piezômetro de tubo aberto. A utilização conjunta de inclinômetros convencionais e inclinômetros fixos, para um acompanhamento mais detalhado das deformações em um talude, pode ser vantajosa.

3.8 O USO DE INSTRUMENTAÇÃO DE CAMPO EM TALUDES DE SOLOS COLUVIAIS BRASILEIROS

Uma das instrumentações de taludes pioneiras no Brasil foi desenvolvida na década de 70, nos estudos da Rodovia dos Imigrantes, por Guidicini, Wolle e Moruzzi (1976). Além desse exemplo, são apresentados aqui outros casos históricos brasileiros de instrumentação de campo.

3.8.1 A ENCOSTA DA SERRA DO MAR NA RODOVIA DOS IMIGRANTES

Este trabalho executado por Guidicini, Wolle e Moruzzi (1976), num maciço da Rodovia dos Imigrantes em São Paulo, foi um dos primeiros taludes instrumentados com inclinômetros no Brasil. A área estudada faz parte das vertentes da Serra do Mar. No trecho analisado, predominam gnaisses, quartzo-biotita-xistos e migmatitos diversos. Os planos de xistosidade, de um modo geral, mergulham para dentro da encosta em ângulos elevados em relação à horizontal.

Os solos deste maciço são, em geral, pouco espessos, pois a dinâmica de evolução das encostas na região não favorece a conservação de grandes espessuras. A única exceção é constituída pelas massas de tálus que se acumulam ao longo destas encostas, em particular no sopé das mesmas, às vezes com espessuras superiores a 10 m. As massas de tálus são depósitos com modo de formação semelhante aos solos coluviais, entretanto são constituídos predominantemente por detritos de rochas sãs e alteradas. O capeamento de solos é constituído basicamente por duas porções distintas: uma superficial coluvial e outra subjacente a esta, representada por solos residuais (alteração de rocha).

O solo coluvial é de extensão generalizada dentro das limitações de gradiente acima citadas, com espessura em torno de 1 m, sendo constituído por uma argila silto-arenosa, muito porosa. Esse solo apresenta, com frequência, sinais de instabilidade, como fendas abertas, resultantes da ação de rastejo, pequenos escorregamentos e tombamento de árvores.

O solo de alteração subjacente ou residual, constituído por grãos de quartzo e feldspato alterado, com mica, é predominantemente arenoso, evidenciando um baixo grau de maturação, sendo definido como solo residual jovem. A espessura deste solo é variável, sendo função principalmente da inclinação do terreno, podendo inclusive estar ausente.

Abaixo do solo de alteração, situa-se o maciço rochoso. A ação do rastejo, sendo muito intensa nestas encostas, atua no próprio maciço rochoso, induzindo o aparecimento de uma zona de blocos deslocados de sua posição original. Esta zona de blocos se assemelha a um enrocamento. O maciço de rocha são encontra-se abaixo desta zona de blocos.

Para a determinação dos deslocamentos destas encostas, Guidicini, Wolle e Moruzzi (1976) optaram pela utilização de marcos superficiais de controle topográfico e fissurômetros. Estes instrumentos foram utilizados para a medição de deslocamentos e de abertura de fissuras na camada mais superficial das encostas. Já para a medição de deslocamentos em profundidade foram utilizados principalmente inclinômetros. Foram instalados também um pluviômetro e um pluviógrafo, para a medição da pluviosidade local, e piezômetros para medição de pressão neutra, com o objetivo de compreender o regime de percolação.

Conforme Guidicini, Wolle e Moruzzi (1976), diversos fatores impediram que se obtivesse boa exatidão do uso de inclinômetros. Entre estes fatores citam-se:

- a) defeitos de fabricação dos tubos guias (irregularidades nas ranhuras ou faces internas, conexões defeituosas);
- b) defeitos de execução, principalmente na justaposição e rebiteagem dos tubos guias;
- c) umidade que tenha penetrado no cabo, no sensor ou no aparelho de leitura;
- d) presença de detritos no interior do tubo (areia, solo e eventualmente calda de cimento);
- e) sensibilidade às variações de temperatura, e outros.

Além disto, conforme os mesmos autores, na região da Serra do Mar as condições de operação desses aparelhos são especialmente difíceis, seja no tocante à umidade e pluviosidade intensas, seja no próprio acesso ao local.

3.8.2 INSTRUMENTAÇÃO DA ENCOSTA DO SOBERBO

O escorregamento de solo coluvial da Encosta do Soberbo foi descrito anteriormente no item 2.1.2 O Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, em convênio com a Diretoria de Geotécnica da Prefeitura do Rio de Janeiro, realizou uma campanha de instrumentação realizada de 1990 a 1992, que está descrita no trabalho de Schilling (1993). O trabalho da COPPE iniciou em 1987 com a instrumentação executada por Pedrosa *et al* citado por Schilling (1993). Essa primeira instrumentação foi destruída com as chuvas de fevereiro de 1988.

A encosta estudada, como já citado anteriormente, foi dividida em 6 zonas denominadas “A, B, C, D, E e F”. Com base no levantamento topográfico de toda a área em movimento após 1988 foi feita uma programação onde seriam estudadas não só a zona “B”, instrumentada em 1987, mas toda a encosta a jusante da Estrada do Soberbo, iniciando em 2 pontos da estrada e chegando até o Rio Cachoeira. Essa encosta foi instrumentada com piezômetros, medidores de nível d’água, inclinômetros e pluviômetros.

Conforme Schilling (1993), através da experiência de Pedrosa *et al*, verificou-se que os piezômetros tipo Casagrande forneceram bons resultados. Como foram executados ensaios de permeabilidade *in situ*, descobriu-se que a permeabilidade do solo local situa-se entre 10^{-2} e 10^{-5} cm/s, compatível com esse tipo de piezômetro.

A escolha do piezômetro tipo Casagrande deveu-se, também, ao seu baixo custo. Devido à grande intensidade dos movimentos da encosta, boa parte dos piezômetros poderia se danificar antes que se iniciassem as obras de estabilização dos movimentos. Uma vez contidos os movimentos poder-se-ia optar por outros piezômetros de maior sensibilidade.

As profundidades de instalação dos piezômetros eram definidas concomitantemente com a execução de cada furo, a partir do momento que se dispunha dos resultados das sondagens, de modo que houvesse piezômetros instalados no maciço rochoso, na camada de rocha alterada, no contato solo-rocha e nas demais camadas de solo. Desta

maneira foi possível obter o comportamento da pressão neutra e do fluxo subterrâneo ao longo de todo o perfil. As leituras dos piezômetros foram feitas diariamente.

Os medidores de nível d'água consistiam de tubos de PVC, perfurados e envoltos em bidim, sem o selo característico dos piezômetros. O espaço existente entre o tubo e a parede do furo de sondagem era preenchido com areia lavada.

A profundidade máxima de instalação dos medidores de nível d'água foi cerca de 5 m, devido ao elevado nível do lençol freático em boa parte da encosta e, também, por terem sido aproveitados furos onde foram instalados piezômetros para se instalar medidores de nível d'água. As leituras desses instrumentos foram feitas diariamente.

Os tubos guias de inclinômetro foram instalados nas estações de instrumentação, de modo que se obtivessem leituras de piezometria próximas. Segundo Schilling (1993), foram utilizados tubos guias de inclinômetro de 75 mm de diâmetro, com ranhuras em duas direções perpendiculares, denominadas aqui "A e B", sendo que a direção "A" era coincidente tanto quanto possível com a direção do movimento da encosta.

A leitura dos movimentos foi feita através de um torpedo tipo Digitilt, fabricado pela Slope Indicator, que fornece leitura direta dos movimentos.

Os tubos guias foram instalados em furos de sondagem de 10 cm de diâmetro, perfurados 1,5 m em rocha firme, com profundidade já definida através da sondagem, de modo que se garantisse o não deslocamento da extremidade inferior do tubo. O espaço entre o tubo guia e a parede do furo de sondagem foi preenchido com areia lavada.

Segundo Schilling (1993), nas estações S1B, S2B, S1A e S2C, foram previstas inicialmente leituras de recalque através dos tubos guias, deixando-se uma folga de 5 cm entre dois segmentos de tubo guia consecutivos, dentro das conexões. Mais tarde, a idéia de se medir recalques foi descartada. Nessas estações também existiam medidores de nível d'água.

Os inclinômetros restantes, instalados nas estações S1D e S2D, foram executados de maneira similar aos anteriores, diferindo em dois aspectos:

- a) Não houve espaço entre as hastes de 3 m dos tubos guias;
- b) Na fixação das hastes de 3 m dos tubos guias não houve vedação, com o objetivo dos tubos guias serem aproveitados como medidores de nível d'água. Isto ocasionou o surgimento de material terroso dentro do tubo guia durante as medições, que até a data da última leitura não impediu a passagem do torpedo.

As medições do movimento superficial da Encosta do Soberbo foram realizadas através de controle topográfico de marcos superficiais instalados nas zonas "A, B e C". Para obtenção das leituras foram definidos pontos estáveis nas "margens" da encosta em movimento, onde se posicionava um teodolito e se mirava uma baliza colocada na "margem" oposta formando um alinhamento de direção aproximadamente perpendicular à direção do movimento da encosta. Com esta direção definida, eram realizadas leituras de cada marco superficial, através de uma mira deitada e nivelada.

Os piezômetros, os medidores de nível d'água, os tubos guias e os marcos superficiais instalados na Encosta do Soberbo por Schilling (1993) estão apresentados na figura 3.3.

Alguns resultados das medições inclinométricas executadas por Schilling (1993) estão apresentados na figura 3.4. Pode-se observar que o tubo guia foi convenientemente instalado, pois seu ponto de profundidade máxima se manteve imóvel, funcionando como uma referência para os demais movimentos. A movimentação dos eixos "A e B", defasados de 90°, é diversa uma da outra como esperado. Na direção do eixo "A", que é assumida como sendo a direção principal do movimento da encosta, a massa de solo se move em conjunto. Já na direção do eixo B, a massa de solo se move mais nas profundidades de 4 a 8 m, se mantendo mais lento o movimento da superfície.

Conforme Schilling (1993), os registros de intensidade pluviométrica foram obtidos em uma estação pluviométrica existente a 2,5 km da Encosta do Soberbo, e na

própria encosta. Na estação próxima à encosta, a uma altitude de 460 m, existem um pluviômetro e um pluviógrafo de leitura diária. Na encosta em estudo, foi instalado um pluviômetro do mesmo fabricante da estação anterior, a uma altitude de 350 m. Na instalação do pluviômetro, foram tomados cuidados relativos à localização e segurança do aparelho. Esse aparelho foi posicionado a uma distância segura da área do escorregamento e das obras de contenção e drenagem que viessem a ser executadas.

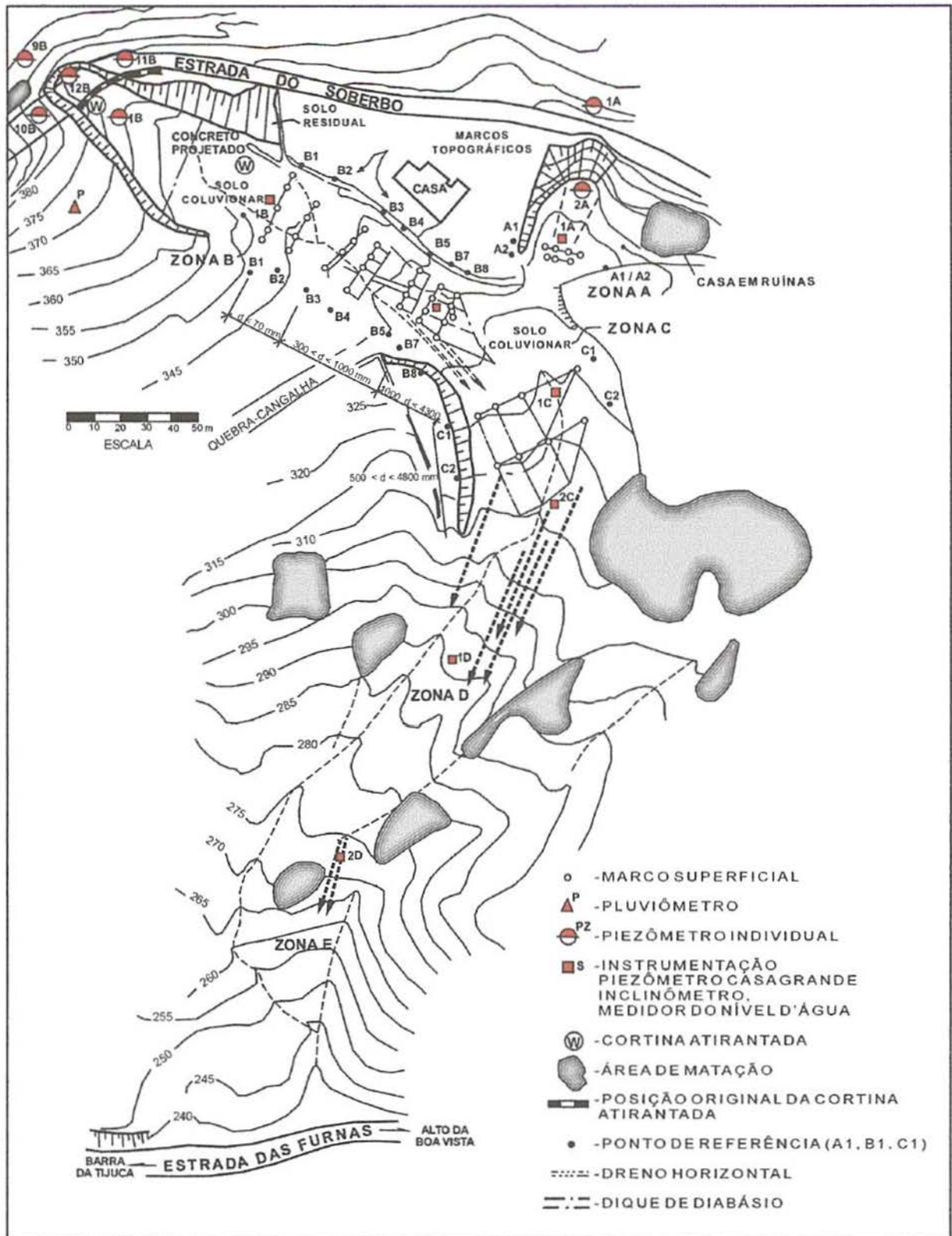


Figura 3.3 - Instrumentação do Escorregamento da Encosta do Soberbo (fonte: Schilling, 1993).

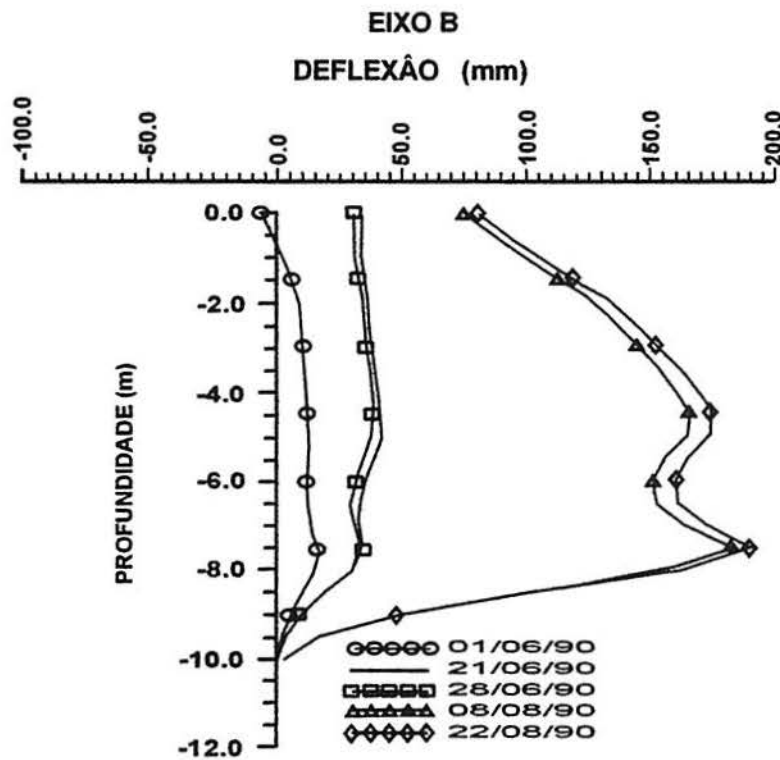
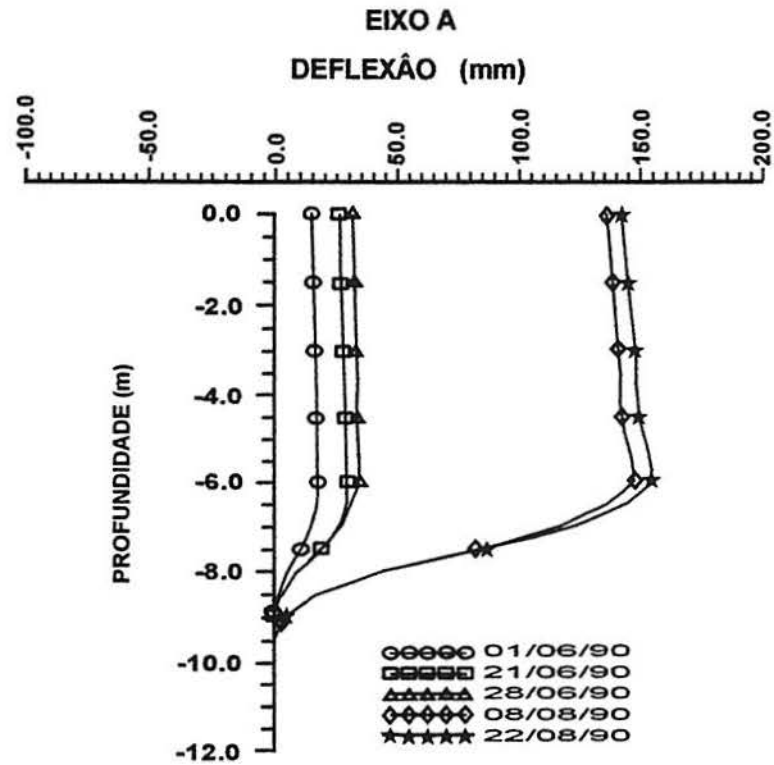


Figura 3.4 - Medições inclinométricas (deslocamento por profundidade) do Escorregamento do Soberbo (fonte: Schilling, 1993).

4 INCLINÔMETROS, TRANSDUTORES E TUBOS GUIAS

A maioria dos inclinômetros fornece dados de inclinação do tubo guia em dois planos mutuamente perpendiculares próximos da vertical. Então, a partir desses dados, podem ser computadas as componentes horizontais do movimento, ambas transversais e paralelas a qualquer direção escolhida (Dunnicliff, 1988). Esses inclinômetros são denominados biaxiais. No início desse capítulo, descrevem-se os tipos mais comuns de inclinômetros, seus transdutores e suas aplicações.

Os tubos guias, suas características e seu modo de instalação na massa de solo são de fundamental importância para se obter medições inclinométricas consistentes. Ao final desse capítulo os tubos guias e sua instalação são comentados.

4.1 INSTRUMENTOS PARA LEVANTAMENTO EXPEDITO

O indicador de superfície de ruptura é um instrumento simples e grosseiro utilizado para medições expeditas em taludes instáveis que posteriormente poderão ser intensivamente instrumentados. Esse instrumento constitui-se de um tubo de plástico (PVC) instalado em um furo de sondagem. No interior desse tubo é baixada, até o fundo, uma pequena chumbada (peso de chumbo para pescaria) fixada a um fio de náilon ou metálico.

Quando a massa de solo instável começa a se movimentar no talude, o tubo de PVC é rompido pelo cisalhamento do solo na superfície de ruptura. O operador, então, ao tentar içar a chumbada pelo fio, encontra-a presa dentro do tubo justamente na posição em que o tubo foi rompido pelo movimento da massa de solo. O comprimento de fio içado fornecerá uma noção grosso modo da profundidade da superfície de ruptura. Esse

instrumento foi citado por W. Lacerda em 1995 durante visita ao Grupo de Geotecnia do PPGEC.

A determinação expedita da profundidade da superfície de ruptura é de grande valia para a instalação de tubos guia de inclinômetro durante a instrumentação de um talude, porque permite que a porção inferior do tubo guia seja ancorada em solo estável, fora da zona de influência da superfície de ruptura.

Segundo Wilson e Mikkelsen (1978), o indicador de inclinação, também chamado de inclinômetro de pobre (Dunnicliff, 1988), é um dos instrumentos também simples e grosseiros de medição subsuperficial. Esse instrumento expedito consiste basicamente de um tubo de plástico (PVC) semi-rígido de 25 mm de diâmetro colocado em um furo. Hastes metálicas de comprimento crescente são baixadas dentro do tubo em série, e o comprimento de haste que é justamente incapaz de passar a uma dada profundidade fornece a medida da curvatura do tubo nas proximidades desse ponto. Esse tipo de medição pode facilmente ser executado nos tubos aparentes de piezômetros abertos. Se existem muitos planos de ruptura ou se a zona de ruptura é espessa, uma seção de haste sustentada por um arame fino, inicialmente pode ser deixada no fundo do tubo; subseqüentemente a haste é puxada para fora para detectar o limite inferior da movimentação da massa de solo.

4.2 INCLINÔMETROS CONVENCIONAIS

Os inclinômetros convencionais são utilizados para monitorar deformações subsuperficiais em taludes instáveis como apresentado no item 3.2. Para se compreender o funcionamento e a evolução dos inclinômetros convencionais, são comentados os tipos mais comuns.

Um tipo de inclinômetro largamente utilizado possui transdutor de servo-acelerômetro. Segundo Dunnicliff (1988), o servo-acelerômetro é montado num torpedo cuja voltagem de saída é proporcional à inclinação. A versão biaxial inclui dois transdutores, um montado abaixo do outro com planos defasados de 90°. A força requerida para balançar a

massa do pêndulo (servo-acelerômetro) e sua voltagem de saída são diretamente proporcionais ao seno do ângulo de inclinação. A leitura digital, por essa razão, é usada diretamente nos cálculos. Esse inclinômetro tem-se tornado o tipo mais largamente usado.

A Slope Indicator Co., segundo catálogo SINCO (1990), apresenta o inclinômetro biaxial Digitilt 25 projetado para ser usado em tubos guias verticais. Este modelo recente de inclinômetro é conhecido pela sua alta precisão, resposta rápida e estabilidade de longo tempo. O Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRGS adquiriu esse instrumento durante o período de desenvolvimento da parte prática deste trabalho. Outros laboratórios de pesquisa em Geotecnia no Brasil também utilizam esse modelo.

O inclinômetro uniaxial Slope Indicator (200 B) fabricado anteriormente pela Slope Indicator Co., possui um transdutor potenciométrico para medir inclinação. O principal componente do transdutor é um pêndulo de livre movimentação e uma resistência em forma de arco, montado de forma que o centro do arco corresponda com a ponta do pêndulo. A ponta do pêndulo se move dentro da resistência subdividindo-a em duas resistências que formam a metade de um circuito de Ponte de Wheatstone. A resistência de saída depende da posição do pêndulo sobre o arco de resistência e também da inclinação do torpedo. A outra metade da ponte está instalada na unidade de leitura. Esse tipo de instrumento era menos preciso, tendo sido substituído pelo transdutor com servo-acelerômetro (Dunnicliff, 1988).

Existem inclinômetros dotados de transdutores com *strain gages*, atualmente menos utilizados. Neste tipo de inclinômetro, o transdutor é constituído de *strain gages* que são colados em torno de um pêndulo engastado em sua parte superior. A inclinação do torpedo causa deformação de flexão no pêndulo e mudança na leitura do *strain gage*. Um circuito tipo Ponte de Wheatstone é usado para o monitoramento (Dunnicliff, 1988).

Outro tipo de inclinômetro conhecido utiliza transdutores de corda vibrante, também pouco comuns atualmente. Os transdutores de corda vibrante são montados em um pêndulo rígido numa configuração similar ao inclinômetro com *strain gages*. Dois

transdutores são necessários para monitorar a inclinação em uma direção. A unidade leitora contém um controlador de frequência (Dunnicliff, 1988).

Também são conhecidos inclinômetros com transdutores de eletrônível. Segundo Dunnicliff (1988), Cooke e Price, em 1974, registraram o uso de inclinômetros com transdutores de eletrônível, mas em sua versão final não é possível localizar o instrumento exatamente na mesma posição para cada conjunto de leituras. Uma versão de inclinômetro fixo foi considerada mais satisfatória, sendo largamente utilizada, principalmente na Inglaterra.

Ortigão *et al* (1993) descrevem um mini-inclinômetro, projetado e manufaturado pela University of British Columbia (UBC) no Canadá. O mini-inclinômetro UBC contém um transdutor de eletrônível que pode medir ângulos simultaneamente através de dois eixos perpendiculares. Quando o transdutor é inclinado o líquido eletrolítico se movimenta em relação aos eletrodos provocando mudanças em sua resistência em relação ao eletrodo central. Um circuito tipo Ponte de Wheatstone é projetado para fornecer uma voltagem proporcional a inclinação sofrida pelo transdutor. Esse transdutor é conectado a um motor elétrico que permite que o mesmo gire precisamente 180° e tome leituras opostas de inclinação.

4.3 INCLINÔMETROS FIXOS

Segundo Hanna (1985), inclinômetros convencionais não são adequados para monitoramento contínuo ou remoto de deformações em massas de solo. Os inclinômetros fixos, quando comparados aos convencionais, incluem como vantagens leituras mais rápidas, uma opção para leituras contínuas e automáticas e uma opção para transmissão dos dados para locais remotos ou para acionar um alarme se a deformação exceder uma quantidade pré-determinada (Dunnicliff, 1988). São tipicamente usados para monitorar deformações subsuperficiais no entorno de escavações ou dentro de taludes quando é requerido monitoramento rápido e automático.

Os taludes constituídos por solos coluviais, conforme citado no capítulo 2, quando são instáveis se encontram em movimento contínuo. Esse movimento contínuo é lento, em condições climáticas normais, e rápido logo após períodos de chuvas intensas. Portanto, os inclinômetros fixos, por suas características, são particularmente indicados para a instrumentação de taludes de solos coluviais. Esse tipo de inclinômetro permite um monitoramento subsuperficial contínuo do movimento da massa de solo.

Um inclinômetro fixo é geralmente escolhido para operar em furos próximos à vertical e fornece essencialmente os mesmos dados que os inclinômetros convencionais (Dunnicliff, 1988).

Um inclinômetro fixo compreende uma cadeia de sensores cada um contendo um transdutor uniaxial ou biaxial, como mostra a figura 4.1. Os sensores são unidos por hastes articuladas e estão suspensos dentro de um tubo guia inserido em um furo de sondagem (Hanna, 1985). Os transdutores são posicionados em intervalos ao longo do eixo do furo e podem ser concentrados em zonas em que o movimento é esperado. O aparelho geralmente usa tubos guias padrão e pode ser removido para reparos. Contudo, a continuidade das leituras é interrompida quando o aparelho é removido (Dunnicliff, 1988).

Segundo Wilson e Mikkelsen (1978), a maior vantagem do inclinômetro fixo sobre o convencional é a eliminação de problemas de inexatidão de trajeto e repetição de posicionamento. Se a unidade fixa for retirada para reparos, a exatidão global será reduzida a de um inclinômetro convencional. Também os transdutores devem ter estabilidade de zero adequada. Devido a sua exatidão, o inclinômetro fixo pode ser usado para medir pequenos movimentos em rocha.

Os deslocamentos do tubo guia são calculados usando o mesmo método dos inclinômetros convencionais (Dunnicliff, 1988). A partir da tangente do ângulo de inclinação do tubo guia, definido nos pontos de leitura, é determinado deslocamento horizontal de cada ponto. Os deslocamentos são somados e esses resultados permitem definir o perfil deformado do tubo guia. Uma série de leituras possibilita monitorar o comportamento das deformações subsuperficiais ao longo do tempo.

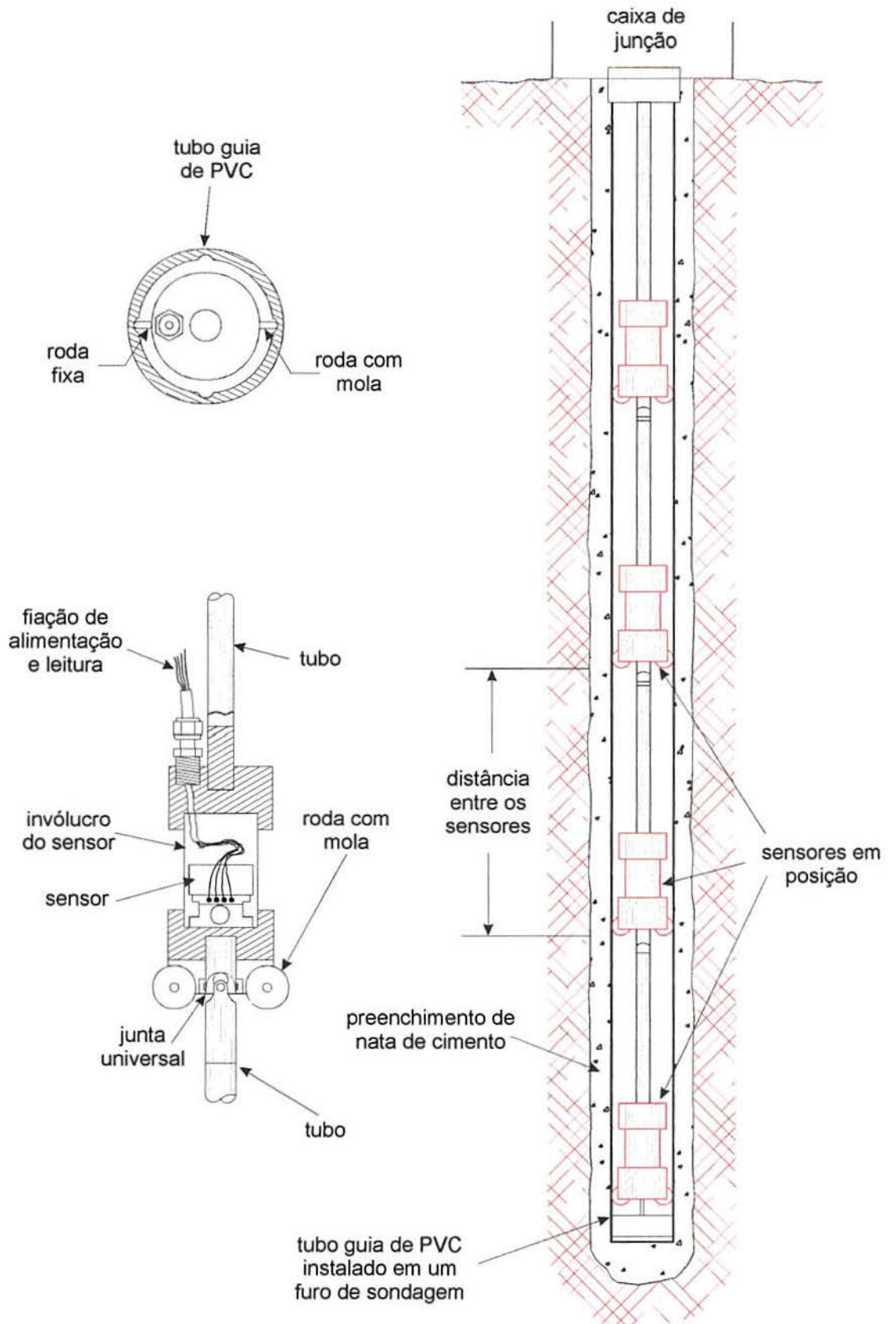


Figura 4.1 - Instalação e detalhe de um inclinômetro fixo (fonte: Wilson e Mikkelsen, 1978).

Existem limitações quanto ao número de sensores que podem ser instalados em um único tubo guia para formarem um inclinômetro fixo. A primeira limitação é a dimensão do torpedo de cada sensor. A segunda é a quantidade de cabos necessários para conduzir os sinais de saída de cada sensor, todos os cabos de todos os sensores devem passar no entorno do sensor mais superior no tubo guia. Portanto, numa cadeia de sensores instalada dentro de um tubo guia, esses sensores não podem estar proximalmente espaçados devido ao limite de quantidade dos mesmos. O espaço entre cada sensor cria uma descontinuidade entre as leituras ao longo do perfil, impedindo a definição de um perfil detalhado do movimento da massa de solo.

Quando é requerido um perfil de deformações detalhado, deve ser instalado um tubo guia separado, adjacente ao inclinômetro fixo. Esse tubo guia deve ser monitorado por um inclinômetro convencional (Hanna, 1985), que permite leituras mais próximas entre si do que um inclinômetro fixo.

4.3.1 APLICAÇÃO DE INCLINÔMETROS FIXOS

Estudando um problema de estabilidade de taludes, Balducci e Custodi (1989) descreveram a utilização de inclinômetros fixos. Em sua experiência, decidiram posicionar no máximo cinco sensores em cada tubo guia, porque um grande número de sensores poderia causar obstrução e problemas dimensionais devido à passagem de muitos cabos de conexão pelos sensores superiores. Também deduziram que instrumentos pontuais em cinco profundidades diferentes poderiam permitir a reconstrução da curva real de deslocamento com boa aproximação.

A distribuição de sensores preconizada por Balducci e Custodi (1989) estabelece que um sensor deveria ser colocado a 2 m da superfície do terreno, imaginando que a essa profundidade pode-se garantir isolamento adequado às perturbações devido ao tráfego de veículos. Outro sensor deveria ser posicionado no fundo do tubo, que deve estar em solo estável, para servir como referência fixa da instrumentação. Os demais foram posicionados em torno da superfície de ruptura, a uma distância de 2 m um do outro por

exigências de tamanho e para garantir o monitoramento de uma camada de 4 m onde se acredita que o deslizamento esteja concentrado.

Em um talude de corte experimental, Cooper e Grant (1989) escolheram dois tipos diferentes de inclinômetros para permitir um equilíbrio entre detalhe e custo. Doze tubos guias padrão de inclinômetro foram instalados para dar cobertura à área do talude. Os deslocamentos laterais foram, então, obtidos manualmente.

Devido à movimentação da massa de solo os tubos guias passam a se movimentar e deformar. As deformações sofridas pelos tubos guias podem chegar a tal ponto que não é mais possível monitorar essas deformações com torpedos de inclinômetro. A principal função do monitoramento por inclinômetros convencionais, portanto, é fornecer uma indicação do modo pelo qual os primeiros estágios de ruptura do talude se desenvolvem até o momento que se torna impossível o uso desses inclinômetros.

Com o monitoramento eletrônico e contínuo do talude, os deslocamentos no seu interior foram determinados por meio de dois inclinômetros fixos instalados no local. Um foi instalado na crista do talude e o outro no terço inferior. Ambas as instalações estavam na mesma seção transversal central do talude. O inclinômetro instalado na crista foi feito com 12 sensores de inclinômetro independentes de 1 m de comprimento. Foram instalados entre as profundidades 1 e 13 m. O inclinômetro inferior compreendia 8 sensores num arranjo similar entre o nível da superfície e 8 m de profundidade. Os inclinômetros fixos representaram os mais caros dos itens dentro do sistema criado por Cooper e Grant (1989), mas exerciam 3 funções importantes:

a) O monitoramento contínuo dos deslocamentos dentro do talude. O menor ciclo possível de leituras que os inclinômetros manuais podiam fornecer era de somente 2 ou 3 conjuntos completos de leituras por semana (se outros sistemas não fossem negligenciados). Isso é insuficiente para fornecer informação útil sobre a real variação nas velocidades de movimentação.

b) Tomar leituras contínuas durante o evento da ruptura. O inclinômetro manual requer acesso a superfície do terreno. Não é possível permitir pessoas sobre o talude

quando a ruptura é iminente. Tubos convencionais também cessam de permitir a passagem livre do torpedo a partir de distorções modestas. Os inclinômetros fixos superam ambos os problemas, permitindo monitoramento remoto e continuando a funcionar com distorções muito maiores.

c) Alarme automático. Os inclinômetros fixos permitem, através do monitoramento contínuo, a instalação de um alarme automático que avisa se ocorrer qualquer aumento súbito na velocidade dos deslocamentos do talude.

4.4 INCLINÔMETRO INTERMITENTE

A concepção inicial do inclinômetro desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Solos, nesta dissertação foi de um inclinômetro fixo como o descrito acima, pois o objetivo da pesquisa é monitorar continuamente os taludes instáveis de solos coluviais. Entretanto partiu-se para uma solução mais arrojada que possui algumas vantagens. Em vez de se utilizar uma corrente de torpedos, optou-se por usar um único torpedo que oscilará automaticamente a intervalos de tempo programados, percorrendo toda a extensão do tubo guia. Esse aparelho, denominado inclinômetro intermitente, apesar de mais complexo, possui vantagens como evitar a concentração de cabos junto aos sensores superiores e economiza o número de sensores utilizados.

O inclinômetro intermitente será uma versão intermediária entre um inclinômetro fixo e um convencional.

4.5 TUBOS GUIAS

O tubo guia é de fundamental importância para a obtenção de medições inclinométricas coerentes e consistentes. As ranhuras guias do tubo servem de referência para a orientação do torpedo durante o seu movimento descendente e ascendente.

Existem, conforme Dunnicliff (1988), tubos guias fabricados em plástico (PVC), alumínio e fibra de vidro, com conexões rígidas ou telescópicas. Tubos guias de aço também são fabricados, mas são usados com menos frequência. No mercado brasileiro, estavam, em 1993, comercialmente disponíveis tubos guias de alumínio.

Os tubos guias de alumínio são ranhurados durante a extrusão, a ranhura aparece pelo lado externo dos tubos como uma protuberância. Os diâmetros externos medidos entre duas protuberâncias opostas variam de 61 a 86 cm (Dunnicliff, 1988). Pode-se observar a forma da seção transversal de um tubo guia na figura 4.2. A denominação das ranhuras está diretamente ligada ao posicionamento do tubo guia na massa de solo em movimento. A direção AN-AS, mostrada na figura 4.2.a, deve corresponder à direção principal do movimento de escorregamento do talude, isto é, a direção do movimento de maior grandeza observado. Já a direção BN-BS deve corresponder à direção perpendicular a direção principal. Evidentemente, o instalador tenta aproximar-se dessa orientação ideal das ranhuras; entretanto, como em geral o movimento do solo em taludes estáveis está sendo estudado quando se instalam os tubos guias, nem sempre se obtém a orientação esperada.

Os tubos guias de alumínio, de fabricação nacional, adquiridos pelo Grupo de Geotecnia do PPGEC – UFRGS, em convênio com o DAER - RS, possuíam as seguintes dimensões:

- a) diâmetro interno: 78 mm;
- b) diâmetro externo: 82 mm;
- c) diâmetro interno nas ranhuras: 80,5 mm;
- d) diâmetro externo nas ranhuras: 85 mm;
- e) largura da base da ranhura: 3 mm;

Os tubos guias com diâmetro menor têm sido utilizados principalmente para o monitoramento de deslocamentos horizontais de estruturas de contenção, para as quais os deslocamentos são menores. Tubos extrudados de diâmetro levemente maior, da mesma forma, são utilizados para conexões rígidas ou telescópicas. A extensão máxima das conexões telescópicas é tipicamente 150 mm.

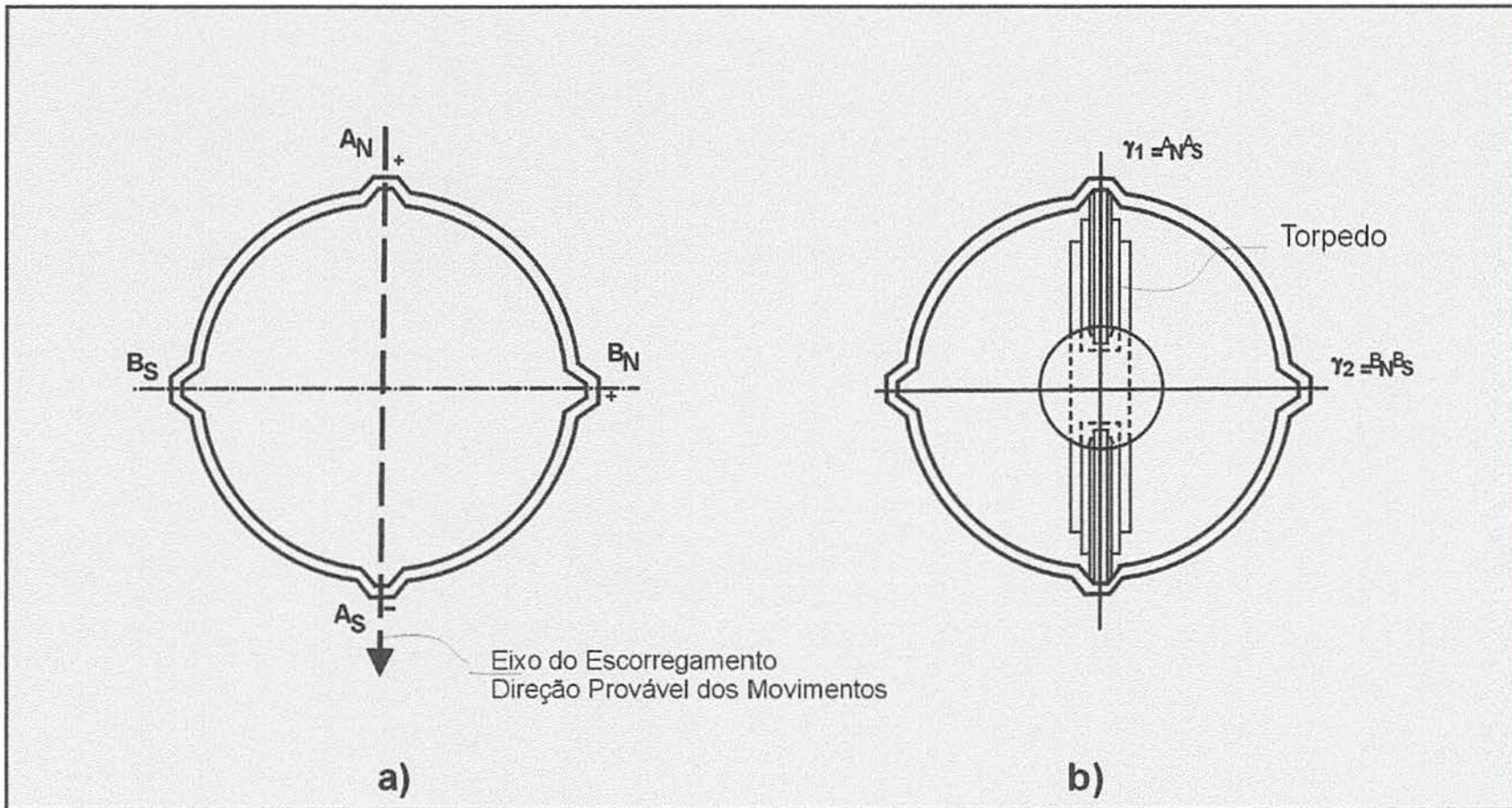


Figura 4.2 - Seção típica de um tubo guia (fonte: Sappa e Sappa, 1995).

Tubos de alumínio estão submetidos à corrosão, tanto pela água de percolação do solo como pela cal livre na calda de cimento (*grouting*) usada durante a instalação. Em alguns solos foram registrados casos de intensa corrosão dentro de um período de poucos meses, com perfuração do tubo guia. Na maioria das aplicações os tubos devem ser, por essa razão, tratados interna e externamente com uma cobertura adequada com pintura epóxi, por exemplo. No entanto, a possibilidade de corrosão potencial permanece em qualquer ponta de tubo ou furos de fixação.

Cuidados devem ser tomados para selar as conexões dos tubos guias e as tampas de fundo contra a intrusão de calda de cimento. Conexões com *O-rings* (raramente utilizadas) não exigem selo adicional, mas as conexões rebitadas usuais normalmente requerem mastique selante e fita aplicados nas juntas entre segmentos de tubo guia e conexões. Os rebites podem eventualmente também cisalhar, devido, por exemplo, a consolidação dos solos do entorno do tubo guia que permite movimento telescópico. Nesses casos, mastique selante e fita também devem ser usados sob as cabeças dos rebites. Igualmente em conexões rígidas com rebites, o corpo do rebite ocasionalmente fica saliente durante a instalação. As cabeças dos rebites devem, então, ser cuidadosamente seladas (Dunnicliff, 1988). Rebites não devem ser instalados nas ranhuras ou em qualquer outro local que possa interferir com o manejo dos torpedos.

4.5.1 TUBOS GUIAS COM RANHURAS ESPIRALADAS

Quando um tubo guia é instalado em um furo de sondagem, a orientação das ranhuras guia do tubo em profundidade não é necessariamente a mesma do que na superfície. A extrusão do tubo guia de alumínio pode causar uma espiral da ordem de 1 grau a cada 3 m de comprimento de tubo. Desvios similares têm sido constatados em tubos guias de plástico extrudados e tubos guias com ranhuras desgastadas mecanicamente (Dunnicliff, 1988).

A exposição ao calor do sol antes da instalação do tubo guia freqüentemente causa o espiralamento de tubos inicialmente certos. Portanto, os tubos guias

devem sempre ser armazenados à sombra e adequadamente apoiados para evitar a flexão dos mesmos.

A espiral de cada comprimento de tubo guia pode ser medida antes da instalação. Dunicliff (1988) cita maneiras de medir esse valor de desvio. Um dos métodos utilizados para minorar o problema é selecionar segmentos de tubo guia e orientá-los de tal modo que as espirais sucessivas se cancelem umas as outras.

As ranhuras espiraladas também podem ser criadas pelo uso de técnicas inadequadas de instalação. Quando os segmentos de tubo guia são instalados, conexões alternadas podem ser giradas para a esquerda ou para a direita antes de serem fixadas, porque as tolerâncias de fabricação comumente permitem algum movimento rotacional.

Quando as ranhuras se desviarem do seu plano de orientação durante a instalação, nunca se deve forçar o retorno a posição original pela rotação do topo do tubo guia (Dunicliff, 1988).

Uma avaliação geral do espiralamento das ranhuras após a instalação é recomendada quando dificuldades forem encontradas durante a instalação e, também, é aconselhável para tubos guias com profundidade maior do que 60 m. Essa avaliação é altamente necessária se é desejado conhecer a direção exata do movimento da massa de solo em profundidade. Dunicliff (1988) cita métodos e instrumentos para executar essa avaliação.

4.5.2 OUTROS PROBLEMAS NA INSTALAÇÃO DE TUBOS GUIAS

Segundo Sappa e Sappa (1995), deve ser dedicada atenção aos princípios fundamentais nos quais se baseiam as medições inclinométricas, aos métodos de instalação dos tubos guias e às influências exercidas pelos fatores estranhos ao real movimento da massa de solo. Foram citados três fatores perturbadores que podem influenciar os resultados medidos:

- a) O tubo guia e o solo do entorno não formam uma entidade única e uniforme;
- b) A abertura nas juntas entre segmentos de tubos guias;
- c) O efeito do desencontro entre os planos que contêm os sensores do instrumento e os planos da linha central das ranhuras.

O primeiro fator foi detectado por Sappa e Sappa (1995) em muitas leituras inclinométricas examinadas que indicam a presença de deflexões no tubo. Essas deflexões ocorreram em diferentes períodos de tempo, mas não poderiam ser devido aos movimentos do solo. Em alguns casos a deformação registrada progride por algum tempo, entretanto em outros casos a deformação para por poucos meses após a medida inicial. Essas deformações não pareciam seguir a direção de máximo declive. Devido a esse fenômeno ter ocorrido em solos não compressíveis, foi considerado que as deflexões registradas foram causadas pela deformação em tubos guia não cimentados. A não cimentação do tubo guia disposto no furo provocou a falta de verticalidade do tubo guia. A figura 4.3 é apropriada para representar a geometria do tubo guia dentro do furo. O estudo desse fator tem contribuído para explicar movimentos aparentes em direções distintas daquelas esperadas e outras dificuldades de interpretação. Essas análises forneceram indicação útil, sugerindo que, igualmente, um movimento registrado na direção esperada pode na realidade estar mascarado, amplificado ou reduzido por distúrbios desse tipo.

A abertura nas juntas entre segmentos de tubos guias foi detectada através da observação de Sappa e Sappa (1995) de que em 34 % das estações inclinométricas examinadas foram encontrados movimentos localizados espaçados a cada 3 metros, ou múltiplos de 3 metros (intervalos equivalentes ao comprimento dos segmentos de tubo guia), em ambas as componentes do movimento. Já que as medições são comumente feitas a partir do fundo do tubo, a intervalos de 0,5 m, nos múltiplos inteiros de 3 m, o movimento observado foi assumido ser devido ao fato de que as rodas guias do instrumento terem entrado no espaço da junta. O acréscimo do movimento do torpedo no tempo foi devido à perda no tubo e não à movimentação da massa de solo. As figuras 4.4 e 4.5 mostram as posições que as rodas guias do torpedo podem assumir dependendo do espaço entre os segmentos de tubo guia.

O desencontro entre os planos que contêm os sensores do instrumento e os planos da linha central das ranhuras foi detectado por Sappa e Sappa (1995) entre as medições como deslocamentos localizados que não poderiam ser atribuídos ao movimento da massa de solo. Tais movimentos ocorreram ao longo da componente BN-BS e muito raramente ao longo da componente AN-AS. Se existem incrustações no fundo e sobre os lados das ranhuras, ou se as molas dos braços das rodas do torpedo estiverem relaxadas, as rodas podem não tocar o fundo da ranhura. Então, o torpedo pode assumir, a uma dada profundidade, diferentes posições no tempo dependendo da tensão exercida pelo cabo e não dependendo da verticalidade do furo. O mesmo acontece se as rodas se tornarem frouxas.

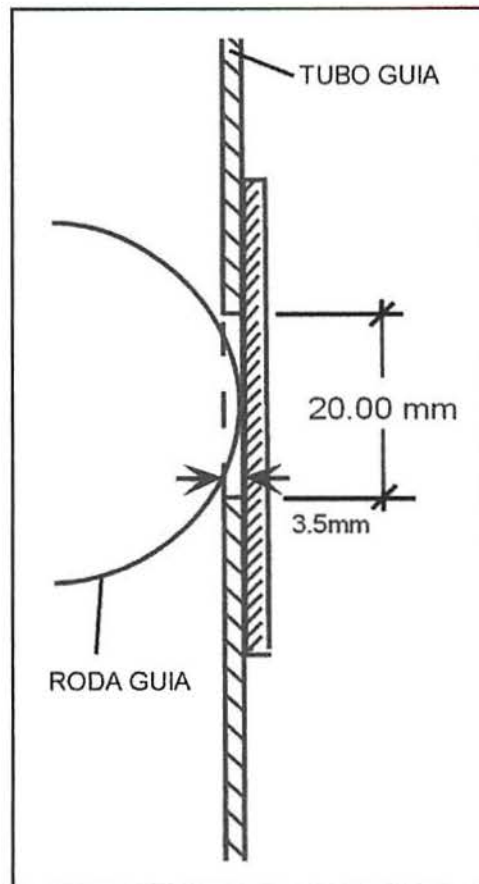
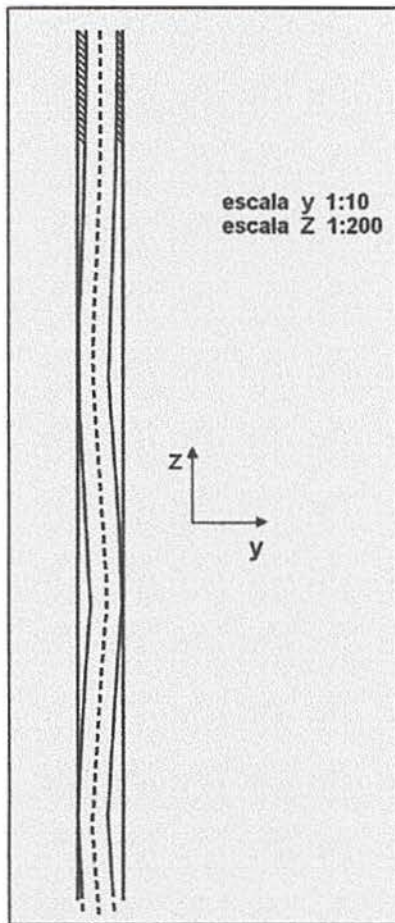


Figura 4.3 (esquerda) - Deflexões em um tubo guia não cimentado (fonte: Sappa e Sappa, 1995).

Figura 4.4 (direita) - Posição da roda guia dentro de uma abertura de junta (fonte: Sappa e Sappa, 1995).

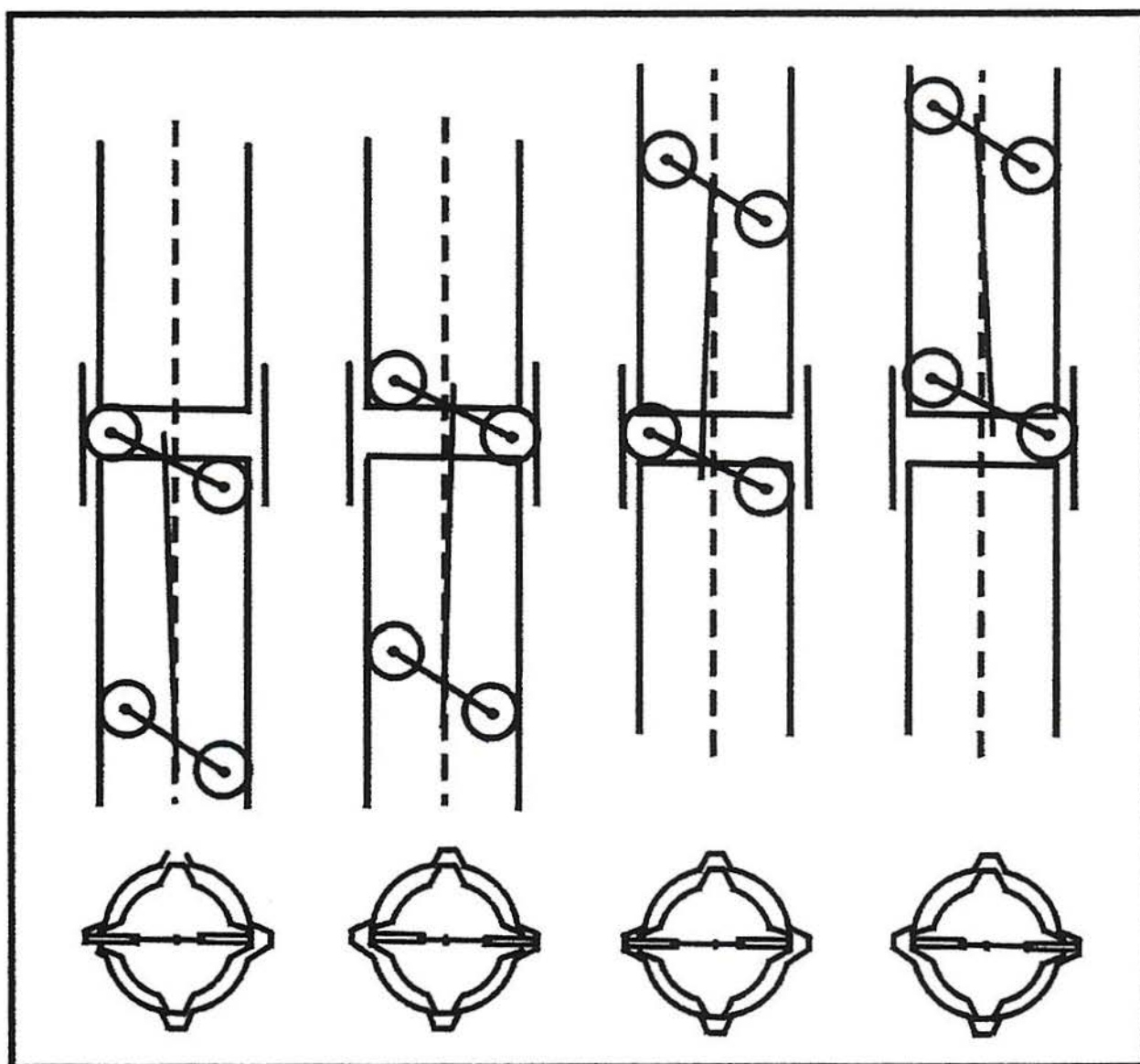


Figura 4.5 - Posições que o torpedo pode assumir devido às rodas guias nas juntas (fonte: Sappa e Sappa, 1995).

5 INCLINÔMETRO COM SENSORES DE EFEITO HALL

O tema principal do presente trabalho é o desenvolvimento do torpedo de um inclinômetro com transdutor baseado em Sensores de Efeito Hall. Durante a fase experimental deste trabalho, foi estudado um protótipo do transdutor com Sensores de Efeito Hall. Posteriormente um transdutor mais evoluído foi desenvolvido. Este transdutor foi instalado em um protótipo de um torpedo de inclinômetro. Cada peça foi cuidadosamente projetada e executada em oficina mecânica de precisão. O inclinômetro ainda continua em desenvolvimento, portanto este trabalho constitui o princípio desta pesquisa na área de instrumentação.

O sistema de controle do inclinômetro, aquisição e armazenamento de leituras está sendo desenvolvido pelo Laboratório de Instrumentação Eletro-Eletrônica do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRGS em pesquisa conjunta.

5.1 O EFEITO HALL

O princípio do Efeito Hall relaciona potencial elétrico e fluxo magnético em placas atravessadas por corrente elétrica. Quando uma placa metálica ou semicondutora, através do qual passa corrente elétrica, é colocada em um campo magnético onde as linhas de fluxo são normais à placa, então, um potencial elétrico é induzido na placa em uma direção perpendicular ao fluxo de corrente. Esse princípio estabelece que o potencial elétrico, denominado Voltagem Hall, é linearmente proporcional a ambos fluxo de corrente e densidade de fluxo magnético (Clayton e Khatrush, 1986 / Bica, 1991).

A aplicação fundamental do princípio do Efeito Hall é a medida da densidade de fluxo magnético. Comumente essa densidade de fluxo é medida com sensores,

conhecidos como Sensores de Efeito Hall com saída linear, que combinam um elemento semicondutor de Efeito Hall e um circuito condicionador de sinal no mesmo circuito integrado. Tipicamente os Sensores de Efeito Hall são energizados com corrente contínua. Esses sensores, com saída linear, podem ser usados para medir deslocamentos (Bica, 1991).

Desde 1985, semicondutores compensados quanto à variação de temperatura, fabricados pela empresa Micro-Switch, têm sido usados em Sensores de Efeito Hall. Em alguns casos, são regulados contra variações de voltagem na alimentação por corrente contínua. Esses sensores possuem uma saída em corrente contínua que varia linearmente com a densidade de fluxo magnético de -40 mT a +40 mT, e podem trabalhar com voltagem de 8 a 16 V em corrente contínua (Clayton *et al*, 1989).

5.2 OS SENSORES DE EFEITO HALL

O Sensores de Efeito Hall, originalmente desenvolvidos para medir densidade de campo magnético, foram recentemente introduzidos na instrumentação geotécnica de laboratório. Transdutores foram desenvolvidos para medir localmente deformações axiais e radiais em ensaios triaxiais. Esses transdutores foram descritos por Clayton e Khatrush (1986), Clayton *et al* (1989) e Bressani (1990). Células de tensão total de contorno e células de tensão cisalhante de contorno foram, em seguida, desenvolvidas para uso em ensaios de modelos reduzidos (Bica e Clayton, 1989; Bica, 1991). Os Sensores de Efeito Hall podem, portanto, ser utilizados para desenvolver uma larga gama de instrumentos geotécnicos. Presentemente, estão sendo direcionados esforços para estender a aplicação destes sensores a medições de campo (Bica *et al*, 1994) como o inclinômetro com Sensores de Efeito Hall.

Estão comercialmente disponíveis Sensores de Efeito Hall com condicionador de sinais integrado. Estes sensores são pequenos (15 mm x 8 mm x 1 mm) e leves (possuindo uma massa de aproximadamente 0,35 g). Sua tensão elétrica, ou voltagem, de saída é grande: entre 2 e 6 V CC, dependendo da densidade de fluxo magnético e da orientação. A estabilidade à temperatura é excelente (Bica *et al*, 1994). Conforme Clayton *et*

al (1989), a tensão de saída do semicondutor pode ser alterada algumas vezes de 2 a 3 V, quando um magneto é movido nas proximidades da sua posição mais sensível.

Para produzir um transdutor de deslocamento são requeridos: um Sensor de Efeito Hall (constituído de um semicondutor), um ou mais magnetos e as partes mecânicas para os sustentar. Quatro configurações básicas do conjunto sensor-magneto têm sido usadas em instrumentação geotécnica. Essas configurações estão apresentadas na figura 5.1 e citadas a seguir:

- a) Magneto simples, deslocamento axial;
- b) Magneto duplo, bipolar, deslocamento lateral;
- c) Magneto simples, bipolar, deslocamento lateral com peças de polo e
- d) Magneto duplo tandem, bipolar, deslocamento lateral.

As conexões elétricas para a fonte de tensão e o instrumento de leitura de saída são mostradas na figura 5.2. Quando a configuração do transdutor utiliza um único sensor as conexões necessárias estão apresentadas da figura 5.2.a. Entretanto, para se obter maior sensibilidade podem ser utilizados 2 sensores, em uma configuração diferencial, conforme apresentado na figura 5.2.b. Nessa configuração a tensão de saída do transdutor é obtida da diferença da tensão de saída de cada semicondutor.

As relações entre a tensão de saída e o deslocamento nos transdutores com Sensores de Efeito Hall estão apresentadas na figura 5.3. Quando a configuração do transdutor pressupõe o deslocamento axial entre o sensor e o magneto (configuração a), a relação típica entre deslocamento e tensão de saída não é linear, conforme está apresentado na figura 5.3.a. De outro modo, quando a configuração do transdutor pressupõe o deslocamento lateral entre sensor e magneto (configurações b, c e d), a relação típica entre deslocamento e tensão de saída possui um trecho linear como está apresentado na figura 5.3.b.

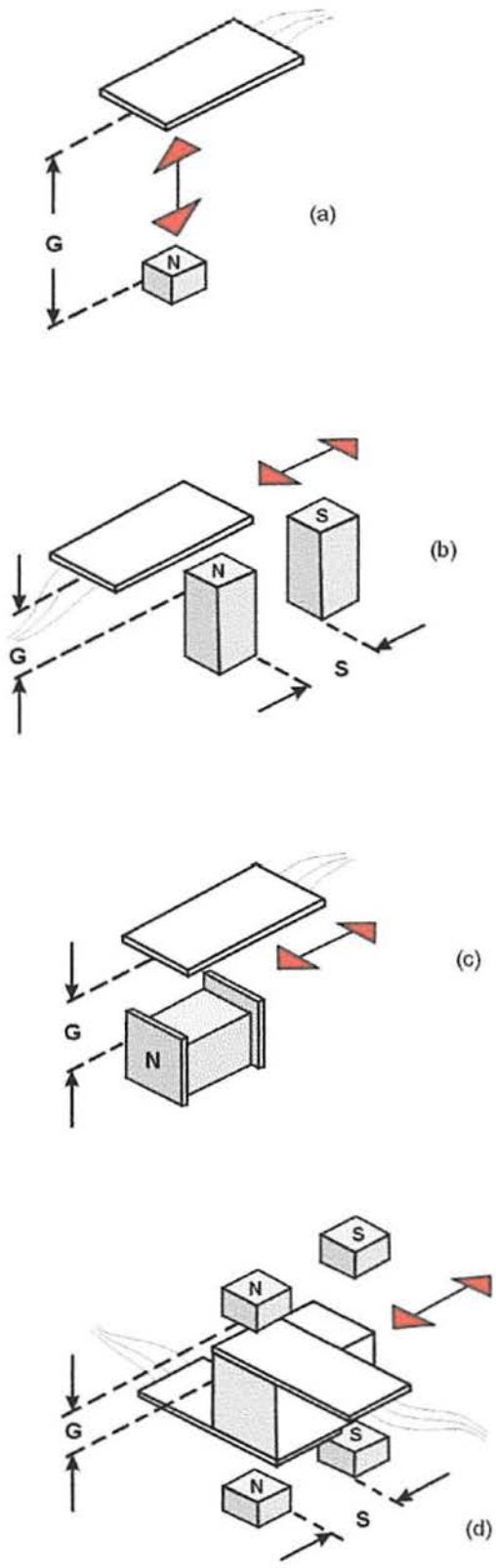


Figura 5.1 - Configurações básicas de sistemas sensor-magneto (fonte: Clayton *et al*, 1989).

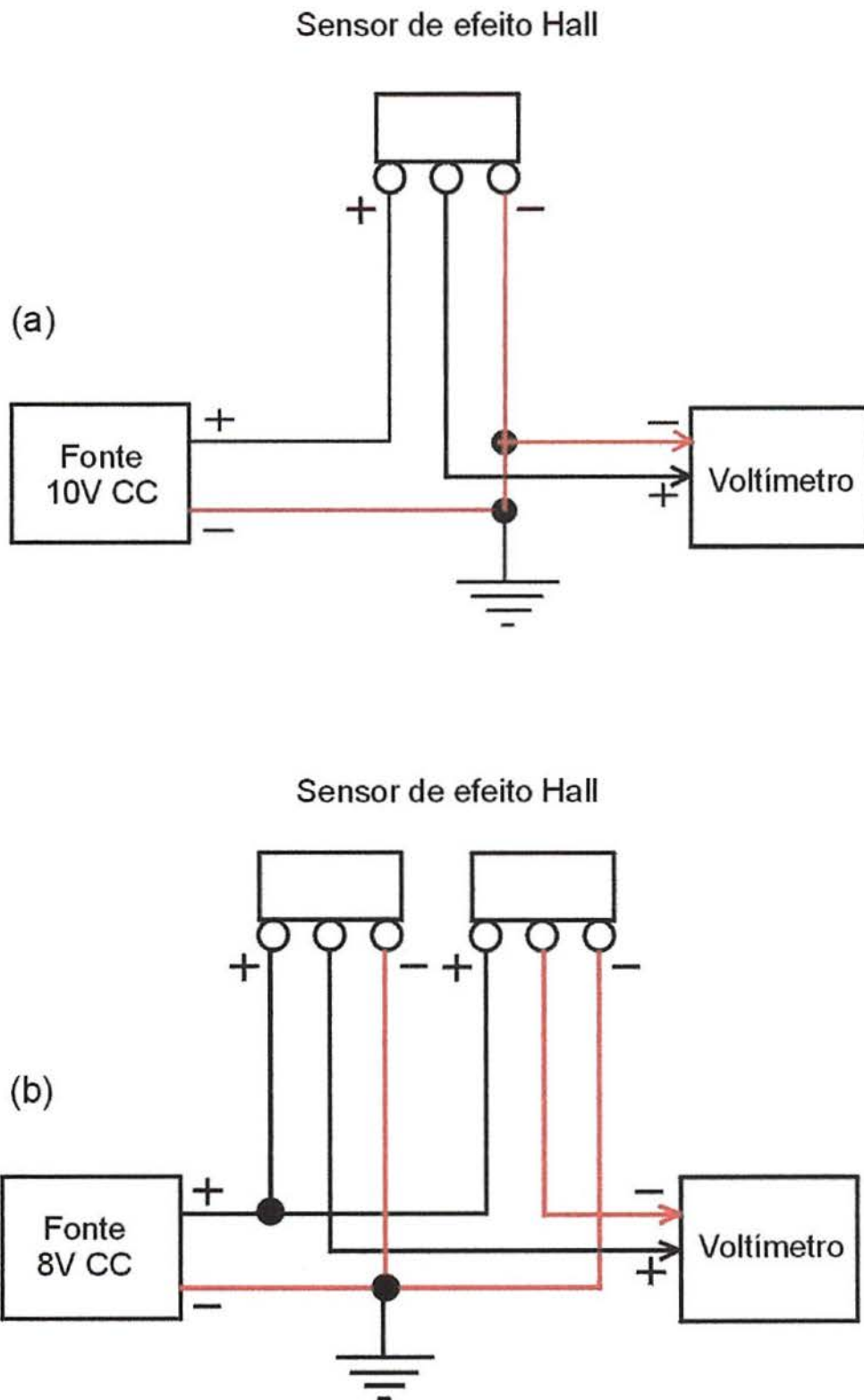


Figura 5.2 - Conexões elétricas do sistema sensor-magneto (fonte: Clayton *et al*, 1989).

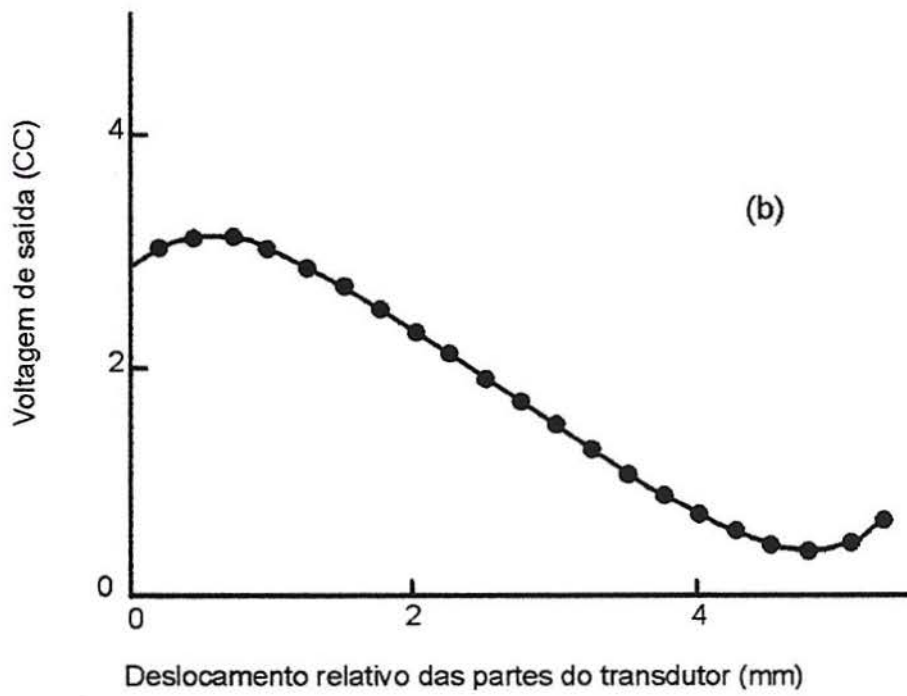
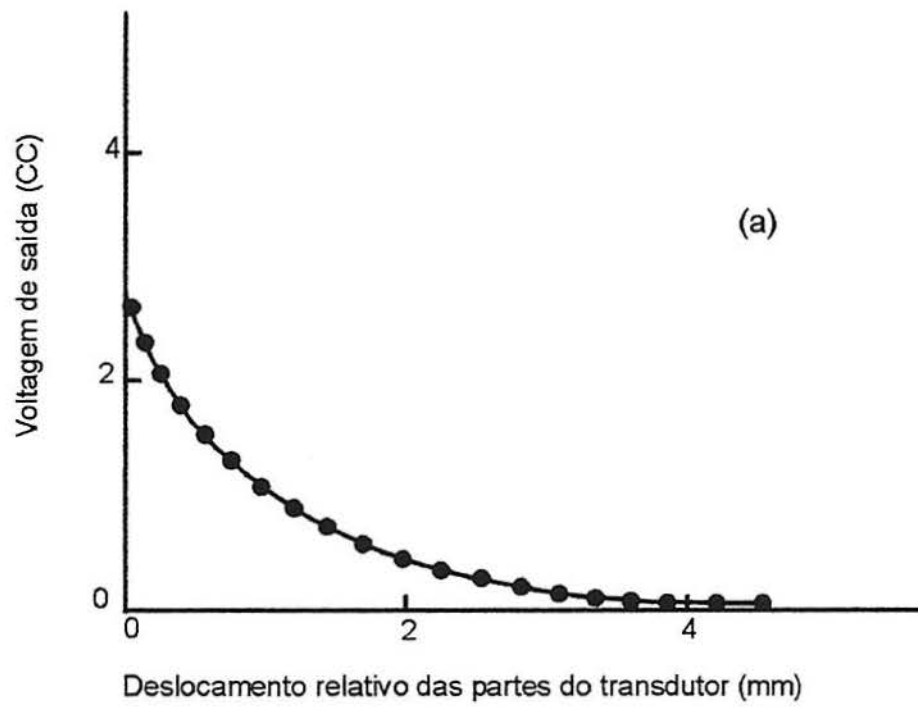


Figura 5.3. - Relação voltagem / deslocamento de saída (fonte: Clayton *et al*, 1989).

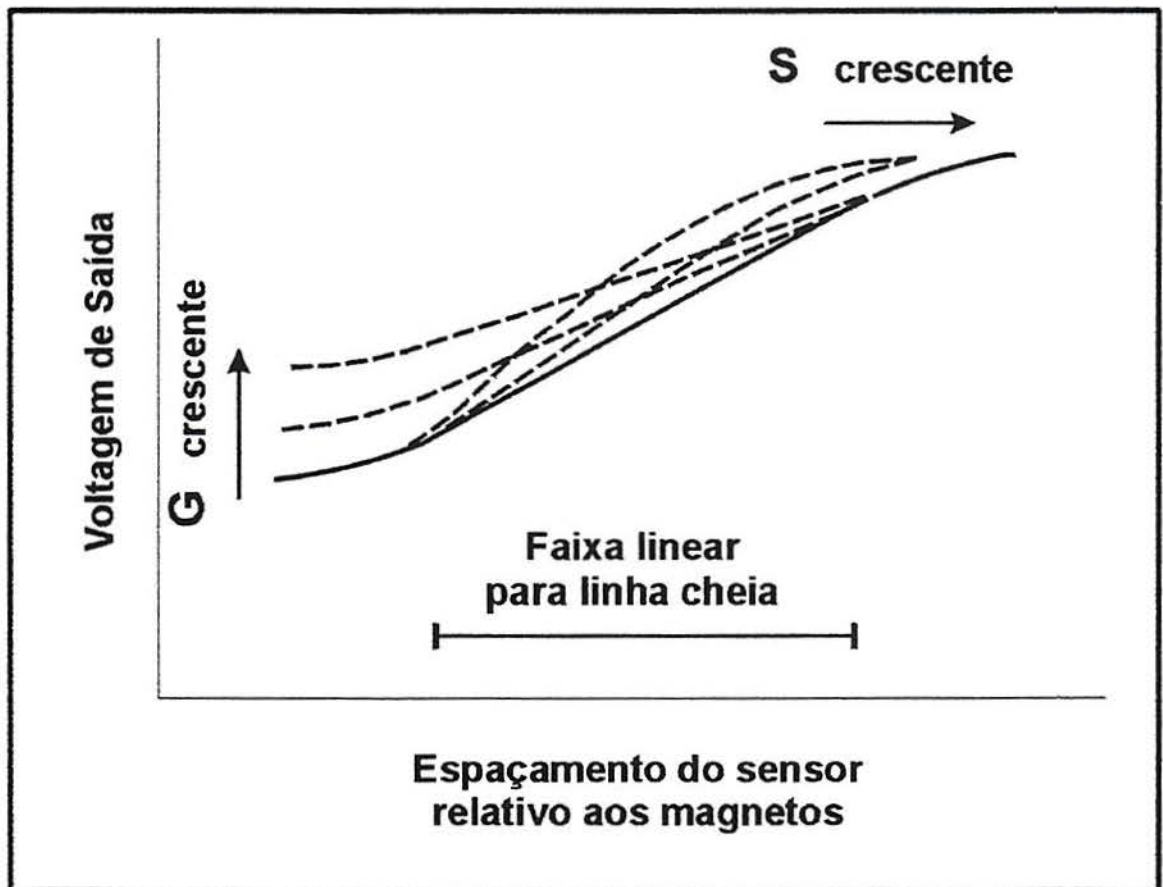


Figura 5.4. - Efeito da variação espaçamento “G” e da separação “S” na saída da configuração duplo magneto, bipolar com deslocamento lateral (fonte: Clayton *et al*, 1989).

As várias configurações de deslocamento lateral utilizam dois polos magnéticos, tanto pelo uso de 2 magnetos com eixos “N e S” paralelos (configurações b e d) como pela extensão dos polos lateralmente em direção ao sensor por meio de peças ferromagnéticas leves nos polos (configuração c). O semiconductor de Efeito Hall é deslocado de tal modo que passa primeiro sobre um polo e, então, passa pelo polo oposto (N e S). Essa configuração tem a vantagem que pode, com projeto cuidadoso, produzir uma saída que possua um trecho com boa linearidade em relação ao deslocamento lateral da placa semicondutora (Clayton *et al*, 1989).

A figura 5.4 mostra a influência das várias separações “S” entre os magnetos e o espaçamento “G” entre os magnetos e o semiconductor, para a configuração duplo magneto, bipolar e deslocamento lateral.

Quando a separação “S” aproxima-se da largura mínima da face do polo do magneto, observa-se que um acréscimo no espaçamento “G” resulta também em um acréscimo na faixa linear do sistema. Além deste valor da separação “S”, a tensão de saída se torna fortemente não linear.

A sensibilidade da tensão de saída pode ser aumentada por decréscimo do espaçamento “G”. Para serem medidos deslocamentos pequenos com alta sensibilidade, a separação “S” é reduzida a zero, e o espaçamento “G” é reduzido a um valor tão pequeno quanto praticável (Clayton *et al*, 1989).

5.3 TRANSDUTORES COM SENSORES DE EFEITO HALL

A evolução do projeto dos transdutores com Sensores de Efeito Hall é aqui apresentada. As dificuldades encontradas em desenvolver esses transdutores e as vantagens por eles alcançadas foram estudadas por Clayton e Bica e apresentadas nos trabalhos citados nesse capítulo. Seus trabalhos serviram de subsídios para desenvolver o transdutor a ser apresentado nessa dissertação nos itens 5.4.1 e 5.4.2.

O princípio básico escolhido para a célula de tensão total normal, desenvolvida por Clayton *et al*, (1989), foi a medição de deslocamento entre o centro de um diafragma em relação a um anel grosso solidário no contorno desse diafragma.

Inicialmente, a configuração magneto simples com deslocamento axial foi usada (fig. 5.1.a). Contudo, a experiência com um primeiro protótipo da célula sugeriu que a configuração mais eficiente era a magneto duplo, bipolar com deslocamento lateral. Essa configuração foi requerida com o objetivo de medir os deslocamentos muito pequenos envolvidos. Magnetos pequenos, constituídos de terras raras, com 2 mm por 1 mm, foram usados com uma separação “S” reduzida a zero, e um espaçamento “G” reduzido ao mínimo executável, aproximadamente 0,1 mm. Embora essa configuração tenha relativamente fornecido uma alta sensibilidade, quando comparada com a de transdutores anteriores, a faixa máxima da voltagem de saída permaneceu somente em torno de um décimo dos valores obtidos previamente. A sensibilidade à temperatura foi um problema potencial, devido às características do semicondutor.

Então, o tipo de semicondutor foi trocado, o usado no desenvolvimento seguinte da célula possuía melhor compensação interna de temperatura, mas não possuía estabilização da voltagem de entrada. Para superar o problema de compensação da voltagem, 2 semicondutores com configurações duplo magneto, bipolar com deslocamento lateral foram usados em cada célula (fig. 5.1.d), com a voltagem de saída da célula sendo obtida da diferença entre a saída dos dois semicondutores. (fig. 5.2.b). Nessa nova configuração, a voltagem de saída da célula completa foi suficientemente estabilizada contra variações de voltagem, mas vantagens a mais foram obtidas. Primeiro, o grande *offset* do zero de cada semicondutor individual foi removido. Segundo, devido a um arranjo apropriado dos magnetos, a sensibilidade total da célula foi dobrada. Finalmente, alguma contribuição à estabilidade da temperatura poderia ser alcançada, se necessário, pelo uso de semicondutores com igual sensibilidade a temperatura (Clayton *et al*, 1989).

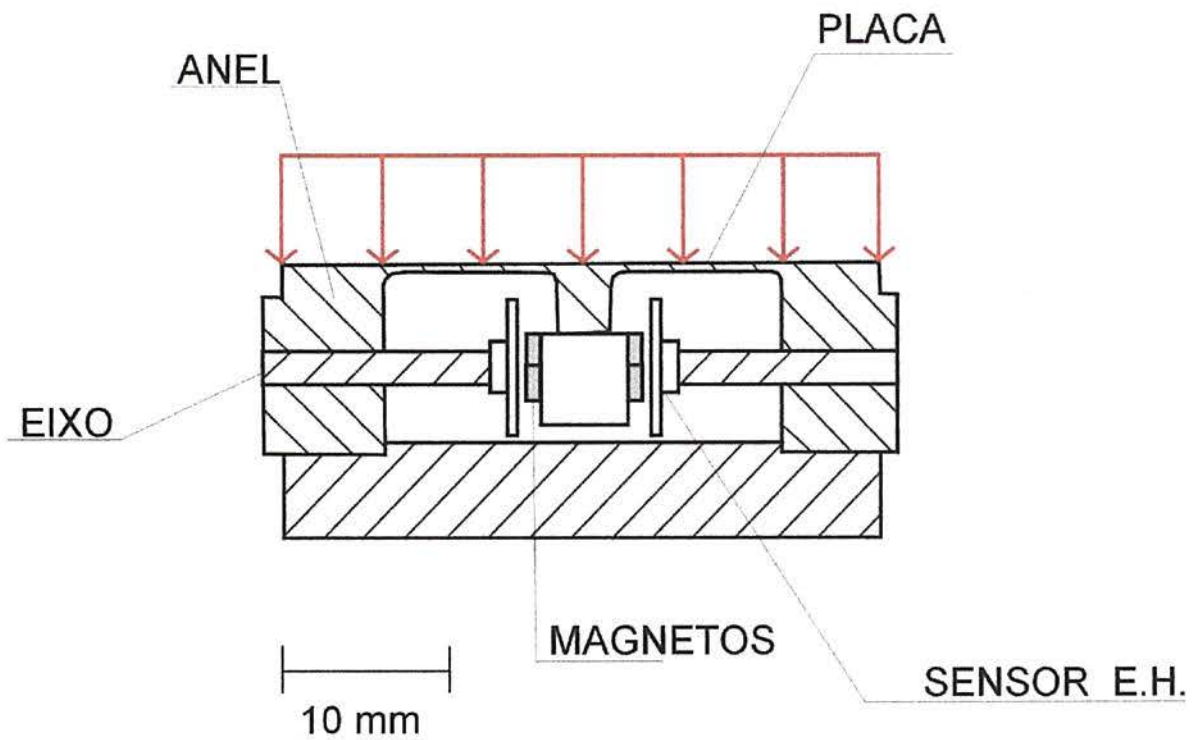


Figura 5.5 - Célula de tensão normal total (fonte: Bica, 1991).

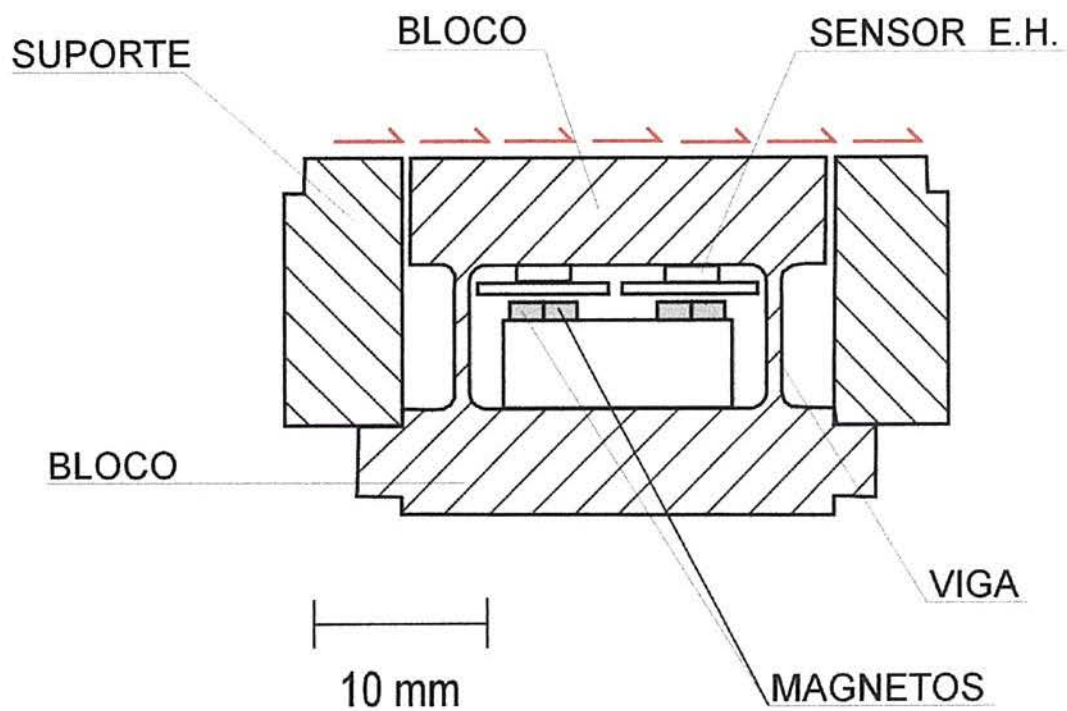


Figura 5.6 - Célula de tensão de cisalhamento de contorno (fonte: Bica, 1991).

O projeto do transdutor é mostrado na figura 5.5. O diafragma e seu anel de contorno e a placa de fundo foram fabricados com aço duro, para minimizar a não linearidade, a histerese e o desvio do zero no descarregamento.

A figura 5.6 mostra dois sensores e quatro magnetos, arranjados de acordo com a configuração (d) sugerida por Bica e Clayton (1989) para construir as células de tensão de cisalhamento de contorno. Cada sensor se move em relação ao par de magnetos mais próximo de modo que ele passe sobre o primeiro polo magnético e subsequente pelo polo oposto. A relação entre a voltagem de saída e o deslocamento é linear próximo do meio da distância entre os dois magnetos. Nesta configuração particular, a diferença entre as tensões elétricas individuais de saída do par de Sensores de Efeito Hall é efetivamente medida (fig. 5.2.b). A alta voltagem de cada sensor, aproximadamente de 4 V CC, é praticamente cancelada. Conseqüentemente, a sensibilidade da medida é dobrada por uma adequada orientação do par de magnetos. Na configuração (d), a sensibilidade da medida pode ser aumentada pela diminuição da separação entre os magnetos “S” e do espaçamento “G” entre o sensor e o par de magnetos (Bica *et al*, 1994).

No transdutor descrito no item 5.4.2., que foi desenvolvido para o inclinômetro nesse trabalho, foram adotados “S” = 0 e “G” com um valor tão pequeno quanto praticável.

Além de todas as vantagens citadas acima, a escolha da utilização de Sensores de Efeito Hall no transdutor do inclinômetro é fruto da experiência acumulada pelo Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRGS.

5.4 DESCRIÇÃO DO TORPEDO DO INCLINÔMETRO

A concepção inicial do projeto de instrumentação era desenvolver um inclinômetro fixo. Este projeto se baseava em modelos apresentados por Wilson e Mikkelsen (1978) e Hanna (1985). Um inclinômetro fixo consiste de uma série de torpedos associados

em cadeia de forma a ficarem dispostos dentro do tubo guia a alturas determinadas. Inicialmente, foi projetado e desenvolvido um protótipo de torpedo para ser utilizado em um inclinômetro fixo. Como os torpedos seriam associados por hastes metálicas, o peso definido para o torpedo mostrou-se a princípio adequado.

O protótipo do torpedo já tinha sido fabricado em uma oficina mecânica de precisão, quando se decidiu por alterar o projeto. Surgiu, então, a alternativa do inclinômetro intermitente comentado no item 4.4. Seria usado o mesmo protótipo do projeto anterior. No novo projeto, o torpedo passou a ser sustentado por um cabo elétrico coaxial; portanto, o peso do torpedo deverá ser reduzido quando for fabricado o modelo definitivo.

O torpedo do inclinômetro possui dois transdutores de inclinação, e estes transdutores são munidos de Sensores de Efeito Hall. Os transdutores foram posicionados no torpedo de forma a estarem defasados de 90° – cada transdutor mede a inclinação do torpedo em relação ao seu eixo em duas direções ortogonais. Como este torpedo foi idealizado para funcionar em tubos guias verticais, os transdutores medem a inclinação do torpedo em duas direções horizontais ortogonais. O torpedo é então considerado biaxial.

O torpedo do inclinômetro é confeccionado em aço inoxidável e convenientemente vedado em relação à entrada de água para não prejudicar o funcionamento do transdutor eletrônico. Quando estiver em uso dentro de um furo de sondagem, o torpedo estará submetido às condições do ambiente natural.

Estando o tubo guia instalado no furo de sondagem, é possível que, ocasionalmente, a água armazenada no solo seja drenada pelo tubo guia. O torpedo, então, poderá trabalhar afogado na porção inferior do tubo guia. É interessante lembrar que, conforme citado no capítulo 2, uma das características dos solos coluviais é armazenar água nos seus vazios, formando muitas vezes aquíferos artesianos.

5.4.1 PROTÓTIPO DO TRANSDUTOR

Antes de se partir para o desenvolvimento do transdutor usado no torpedo do inclinômetro, foi projetado, executado e testado um protótipo desse transdutor confeccionado em latão. O objetivo era verificar a viabilidade da proposta.

A definição da forma do transdutor foi inspirada na célula de tensão cisalhante de contorno utilizada por Bica e Clayton (1989). Os resultados das calibrações do protótipo foram positivos decidindo-se por adotar a mesma forma para o transdutor do inclinômetro.

5.4.2 O TORPEDO E O TRANSDUTOR DESENVOLVIDOS

O torpedo projetado foi idealizado para trabalhar em tubos guias verticais. Esse instrumento foi calibrado para essa função, entretanto os transdutores podem ser adaptados futuramente para trabalhar na horizontal ou inclinados.

No torpedo, os transdutores estão vinculados a uma peça central. Tampas em forma de copos são atarraxadas à peça central onde estão fixados os transdutores fechando o torpedo. O torpedo do inclinômetro com os transdutores está apresentado na figura 5.9. Quando o transdutor é inclinado da vertical, surgem deslocamentos gerados por flexão e cisalhamento devido ao seu próprio peso.

Esse transdutor não foi fabricado como uma peça única, sendo constituído por duas bases maciças vinculadas por duas vigas muito finas (lâminas de aço), assemelhando-se a um pórtico flexível, conforme mostra a figura 5.8. Uma das bases é livre para se movimentar pelo seu próprio peso quando o transdutor é inclinado, como está apresentado na figura 5.7. Devido a isso, modificações no projeto podem ser facilmente implementadas, embora alguma histerese possa ser introduzida. Convém lembrar que todas as peças acima citadas foram confeccionadas em aço inoxidável em uma oficina mecânica de precisão existente na Escola de Engenharia da UFRGS.

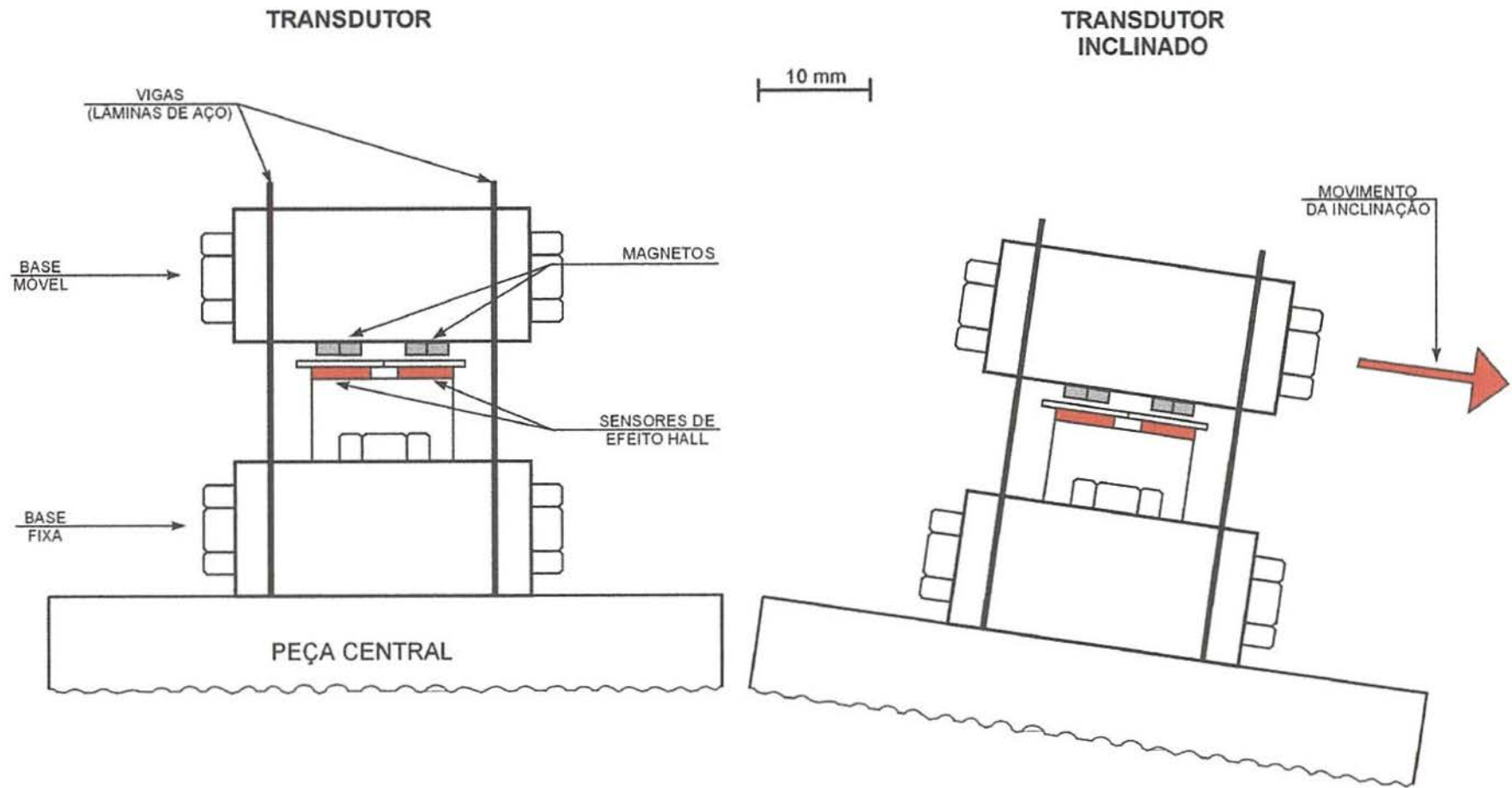


Figura 5.7 - Transdutor com Sensores de Efeito Hall

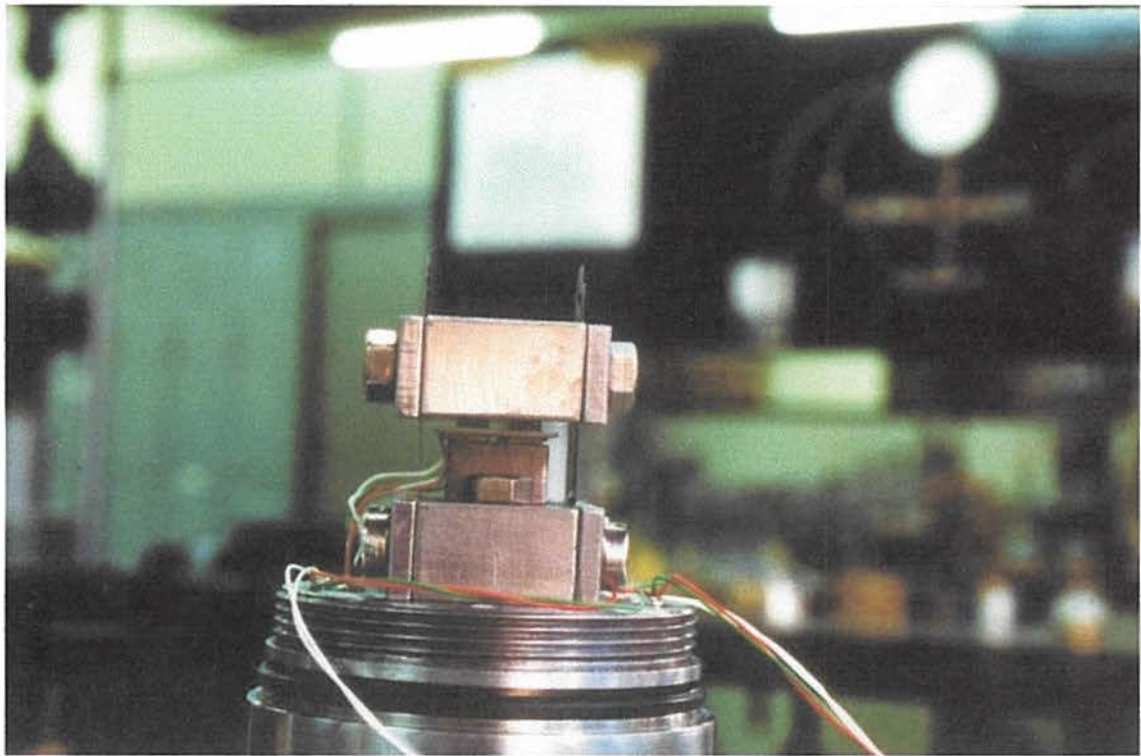
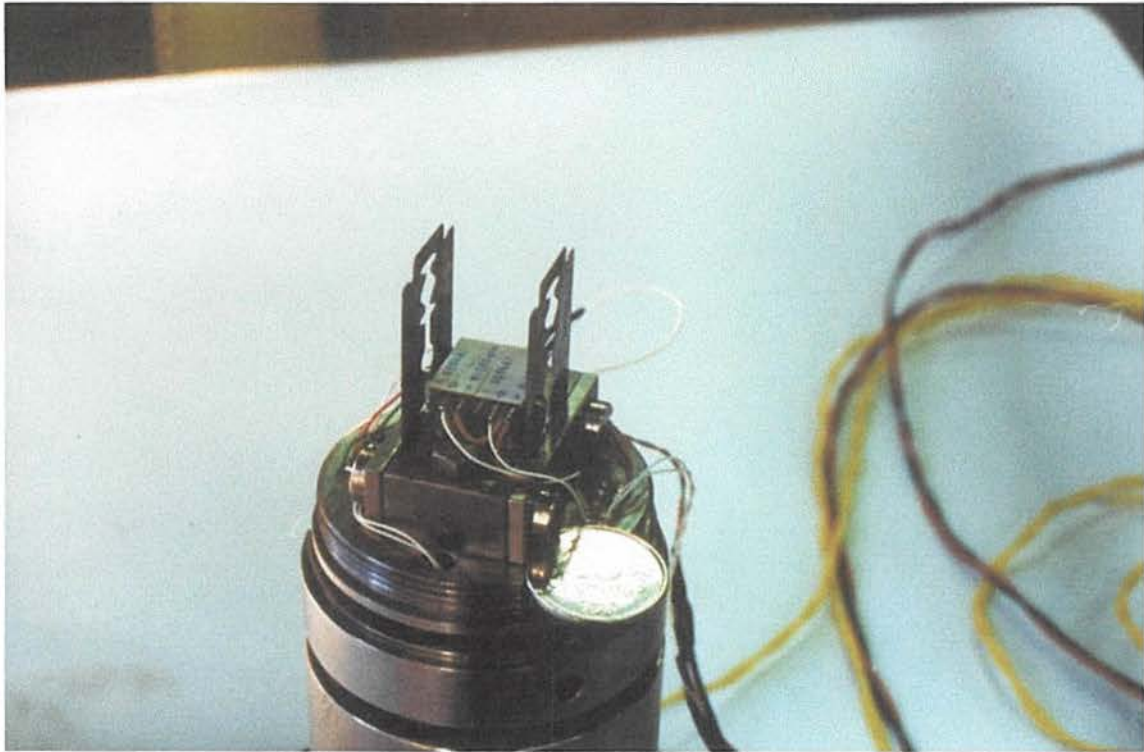


Figura 5.8 - Fotos do transdutor com Sensores de Efeito Hall

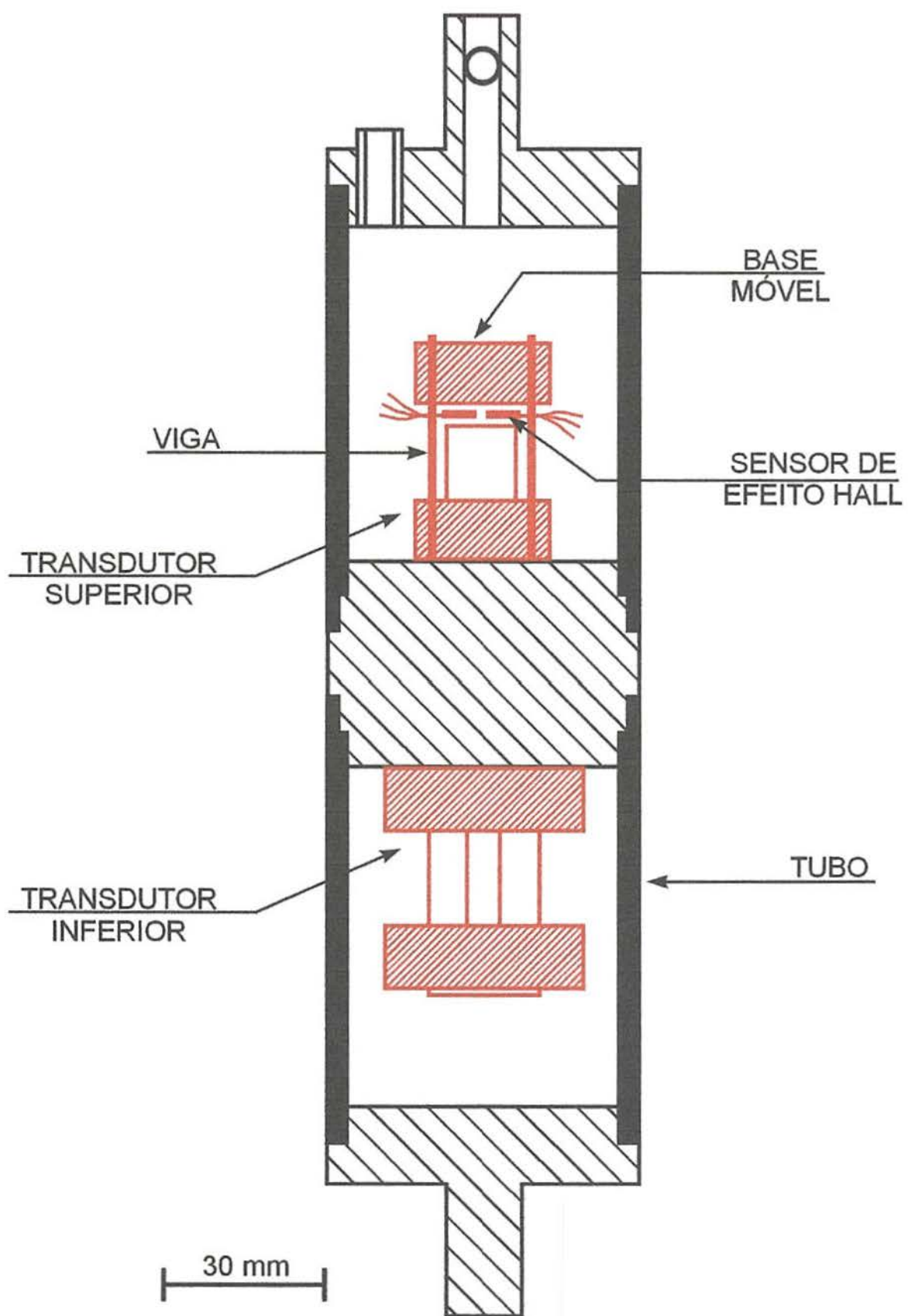


Figura 5.9 - Torpedo do inclinômetro

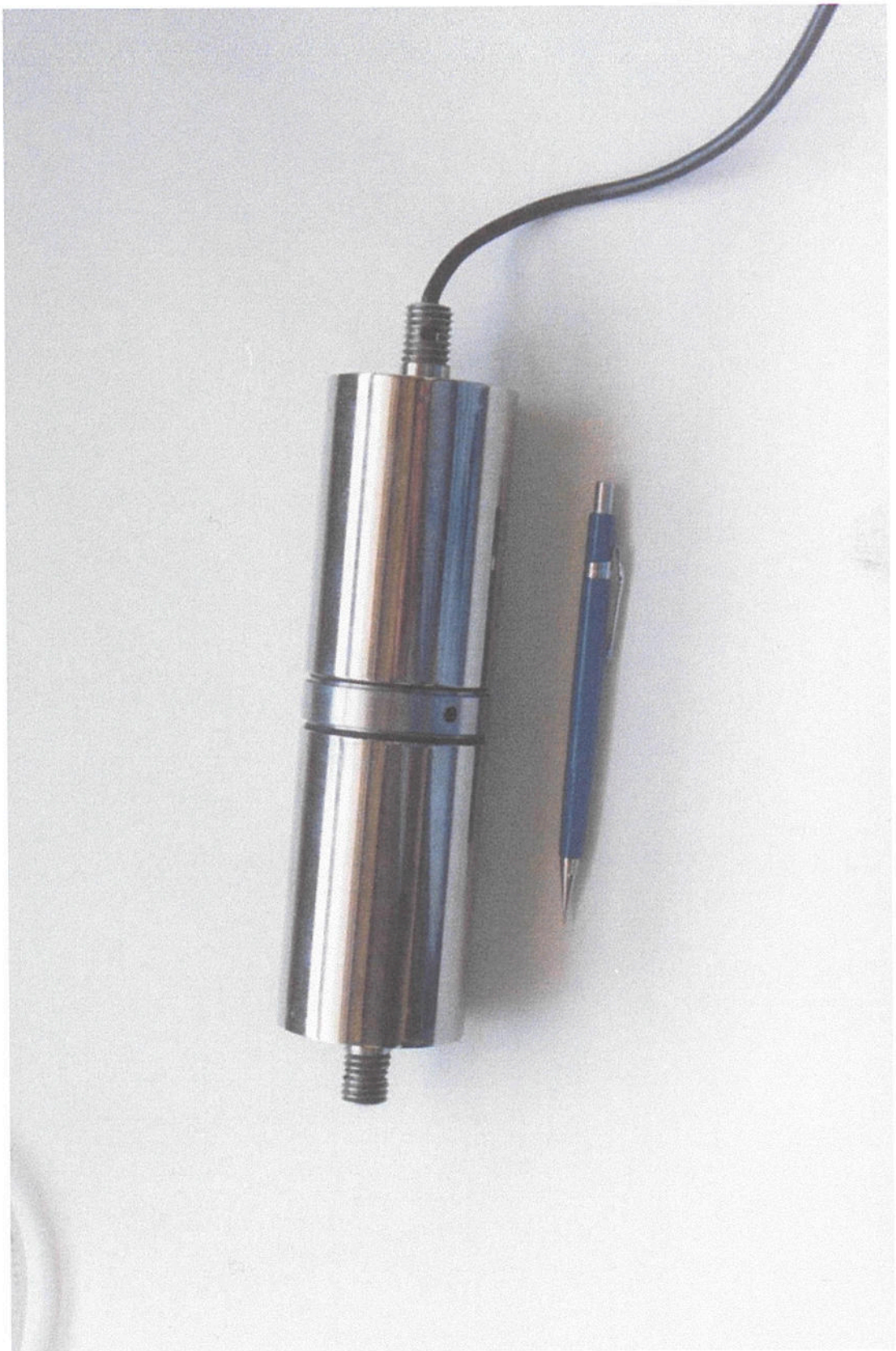


Figura 5.10 - Foto do torpedo do inclinômetro

O torpedo é fechado pelas tampas metálicas. A peça central é dotada de *O-rings* para vedar o torpedo, impedindo a entrada de água e de umidade que danificariam os circuitos elétricos. Essas tampas metálicas, em forma de copos, possuem um pino na sua base alinhado à direção do seu eixo, como mostram as figuras 5.9 e 5.10. Este pino é rosqueado de forma a permitir a fixação das rodas do inclinômetro e a fixação do torpedo no calibrador.

A peça central possui em suas faces, tanto externas como internas, marcas que permitem a orientação da montagem, feitas durante a sua fabricação. As marcas das faces internas garantem a perfeita perpendicularidade entre as direções de deformação dos transdutores. As marcas da superfície cilíndrica externa permitem a orientação do torpedo em relação a seus transdutores, mesmo que o torpedo esteja fechado. Isto facilitou a calibração e o posicionamento correto das rodas guias do torpedo.

Em relação aos Sensores de Efeito Hall, foi mantida a configuração de sensores e magnetos usada por Bica e Clayton (1989) como foi apresentado no item 5.3. No transdutor do inclinômetro a separação entre os magnetos “S” utilizada foi nula e o espaço entre o sensor e os magnetos “G” foi de 0,4 mm. Os Sensores de Efeito Hall utilizados foram da marca Micro-Switch (Honeywell), modelo SS94A1. As conexões elétricas desses 2 Sensores de Efeito Hall, isto é, suas alimentações e suas saídas de tensão foram apresentadas na figura 5.2.b.

5.4.3 CABO ELÉTRICO DE SUSTENTAÇÃO, ALIMENTAÇÃO E LEITURA

O cabo elétrico de sustentação alimentação e leitura a ser utilizado no torpedo do inclinômetro desenvolvido ainda está em estudo. Considerando o funcionamento elétrico do par de transdutores com Sensores de Efeito Hall instalado no torpedo, existe a necessidade de 6 fios ou condutores internos dentro do cabo. O primeiro par de fios serve para alimentar os Sensores de Efeito Hall instalados em ambos os transdutores com corrente contínua de 8 V. Os outros dois pares de fios servem para permitir a leitura da tensão de saída de cada um dos transdutores. Entretanto a limitação da escolha do cabo elétrico não é o seu funcionamento elétrico e sim seu funcionamento mecânico.

A massa do torpedo é aproximadamente 2,8 kg, essa massa deve ser sustentada pelo cabo elétrico sem que o cabo se deforme significativamente. O cabo deve resistir ao esforço de tração contínuo de sustentar o torpedo dentro do tubo guia. Ainda mais, o cabo não pode sofrer deformações significativas em serviço, porque alteraria o comprimento do cabo e, conseqüentemente, a medida da profundidade de cada leitura. A indeformabilidade do cabo é de fundamental importância para a avaliação correta da profundidade em que cada leitura é executada. Como o torpedo apresentado nessa dissertação é apenas um protótipo, recomenda-se que o próximo torpedo a ser desenvolvido seja mais leve.

5.4.4 RODAS GUIAS DO TORPEDO

O sistema de rodas guias do torpedo do inclinômetro foi desenvolvido pelo Engenheiro Mecânico Juan Carlos Sandoval Ortiz, professor do Curso de Engenharia Mecânica da UFRGS. As rodas são fixadas aos pares, sendo cada par acoplado a uma base que é fixada nos copos de fechamento do torpedo. As bases são cilíndricas, possuindo o mesmo diâmetro dos copos do torpedo, e são dotadas de um parafuso central que se atarraxa ao pino rosqueado existente nos copos. O parafuso que fixa a base do sensor superior possui um furo na direção do seu eixo para permitir a passagem do cabo elétrico de sustentação e leitura.

As rodas guias estão dispostas em posição diametralmente oposta, como pode ser observado na figura 5.11. Essa disposição de rodas é típica em torpedos de inclinômetro. Os mancais dos eixos das rodas são fixados a molas que pressionam as rodas do torpedo contra as paredes do tubo guia. Essas rodas possuem 18 mm de diâmetro e são dotadas de rolamentos. A borda externa de cada roda possui a forma trapezoidal para melhor se ajustar à forma também trapezoidal das ranhuras do tubo guia.



Figura 5.11 - Foto do torpedo com as rodas guias.

O posicionamento dos 2 pares de rodas é tão importante quanto o seu bom funcionamento. As rodas devem estar dispostas de forma a pertencerem a um único plano que atravessa diametralmente o torpedo cilíndrico. Esse plano das rodas deve coincidir com o plano de orientação dos transdutores do inclinômetro. Portanto, um transdutor se movimenta na direção do plano das rodas, enquanto que o outro transdutor se movimenta na direção normal a esse plano. Para posicionar as rodas conforme essa orientação foram utilizadas as marcas externas, existentes na superfície do torpedo, que foram orientadas precisamente com os transdutores dispostos internamente.

O funcionamento eficiente das molas das rodas guia que pressionam as mesmas contra o tubo guia é importante para o bom funcionamento do torpedo. No item 4.5.2, Sappa e Sappa (1995) comentam essa questão.

5.4.5 DIMENSÕES EXTERNAS DO TORPEDO

O torpedo do inclinômetro em desenvolvimento possui a forma cilíndrica. Suas dimensões externas são as seguintes: 60 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento, incluindo os suportes das rodas guias. Se comparado a um torpedo de inclinômetro comercial como o Digitilt 25, adquirido pelo Laboratório de Mecânica dos Solos, o inclinômetro com Sensores de Efeito Hall é muito robusto. Enquanto que o torpedo do Digitilt 25 possui 31 mm de diâmetro externo (com as rodas) o inclinômetro em questão possui quase o dobro, com a agravante que o diâmetro interno do tubo guia comercial em uso pelo Laboratório é de 78 mm. Entretanto, o comprimento do torpedo do Digitilt 25 é 667 mm, praticamente o dobro do torpedo em desenvolvimento.

Através de uma análise gráfica expedita, representando ambos os torpedos dentro do tubo guia de 78 mm curvado, observa-se que o comportamento de ambos é semelhante. Para uma deflexão de 16° numa curva de raio 1700 mm, por exemplo, ambos os torpedos percorrem os tubos guias sem problemas.

Um ensaio é apresentado por Ortigão *et al* (1993) para verificar a curvatura e deflexão máxima admitida por um torpedo de inclinômetro. O torpedo é colocado dentro de

um tubo guia e esse tubo guia é flexionado até o torpedo encostar-se às paredes do mesmo, é denominado de flexão máxima do tubo guia.

O mini-inclinômetro UBC, apresentado por Ortigão *et al* (1993), já foi comentado no item 4.2. A principal diferença entre o torpedo UBC e os torpedos comercialmente disponíveis são suas dimensões reduzidas. Esse torpedo possui somente 360 mm de comprimento e 16 mm de diâmetro, enquanto os torpedos comerciais padrão possuem em torno de 650 mm de comprimento e 25 mm de diâmetro. Essa característica permite uma flexão muito maior do tubo guia antes que o torpedo fique trancado, impedindo a continuação dos trabalhos de monitoramento.

Considerando que o torpedo do inclinômetro com Sensores de Efeito Hall é ainda um protótipo, o caminho futuro para melhorar sua eficiência seria diminuir as dimensões do transdutor e, conseqüentemente, reduzir o diâmetro do torpedo.

Segundo Dunicliff (1988), a precisão máxima, em inclinometria, é alcançada através do uso de um intervalo de profundidade de leitura igual ao espaço entre rodas do torpedo do inclinômetro. Se esse intervalo de leitura é maior do que o espaço entre rodas e as deformações do tubo guia não são compostas de curvas suaves e linhas retas entre os pontos de medida, podem surgir erros significativos.

No inclinômetro Digitilt 25 o espaço entre rodas é de 500 mm, enquanto que no inclinômetro desenvolvido nessa dissertação o espaço entre rodas é de 300 mm. Portanto, para se alcançar à precisão máxima do inclinômetro desenvolvido é necessário fazer uma leitura a cada 30 cm de profundidade. Concluindo, com o inclinômetro Digitilt é possível executar aproximadamente 1,5 vez menos leituras do que no inclinômetro desenvolvido para se atingir a mesma exatidão de medição de deformações. A solução seria, além de tornar o torpedo do inclinômetro em desenvolvimento mais estreito, aumentar o comprimento do mesmo.

5.4.6 EQUIPAMENTO NECESSÁRIO AO FUNCIONAMENTO E CALIBRAÇÃO

O inclinômetro com Sensores de Efeito Hall utilizou, para alimentação em laboratório, uma fonte de corrente contínua da marca Leader, modelo LPS163A. Para medir a diferença de tensão de saída do transdutor foi usado, no laboratório, um multímetro digital também da marca Leader, modelo 856G. Todas as calibrações do torpedo do inclinômetro utilizaram esses equipamentos.

5.4.7 O SISTEMA AUTOMÁTICO DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS

O Grupo de Pesquisa do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRGS, através do Laboratório de Instrumentação Eletro-Eletrônica, projetou um equipamento de monitoração contínua e automática para o inclinômetro com Sensores de Efeito Hall. Este trabalho foi desenvolvido conjuntamente entre os grupos de Geotecnia e Eletrônica, permitindo o desenvolvimento do sistema microcontrolado de alimentação e controle do inclinômetro e, principalmente, aquisição contínua dos dados. Esse sistema de alimentação, controle e aquisição contínua de dados para o inclinômetro intermitente pode ainda ser considerado um protótipo. O autor participou deste trabalho principalmente através da definição das necessidades e especificações de operação do sistema de aquisição de dados.

O sistema microcontrolado, projetado e apresentado por Faccin, Zuccolotto, Brito *et al* (1996), é responsável pelo controle e aquisição de dados no inclinômetro em questão. Esse sistema foi projetado e testado a partir do sistema de desenvolvimento IEE98, um equipamento projetado e construído pelo Laboratório de Instrumentação Eletro-Eletrônica. Após o desenvolvimento e depuração do programa aplicativo, foi construído o primeiro protótipo a ser utilizado no campo.

O núcleo do sistema é o microcontrolador MC80C196KC, de fabricação Intel. Este componente foi escolhido por apresentar um bom conjunto de recursos incorporados, além do baixo consumo de energia. A alimentação dos transdutores e dos

circuitos analógicos é fornecida por uma fonte de tensão regulada (8 V) acionada pelo microcontrolador. Desta forma consome-se energia somente durante a realização das medições (Faccin, Zuccolotto, Brito *et al*, 1996).

O microcontrolador possui um *timer/counter*. Os sinais de tensão diferenciais provenientes do transdutor (tensão de saída) são condicionados por dois amplificadores. Além destes sinais, também são monitoradas a tensão da bateria, a tensão de alimentação do transdutor e a corrente consumida pelo motor. Tem-se, ainda, no circuito um sinal que faz a leitura da posição do torpedo no tubo, além das chaves de fim de curso que garantem a segurança, evitando que o torpedo se choque com o fundo do tubo guia, e mantêm a referência de posição inicial. O cabo de sustentação, alimentação e leitura do torpedo será controlado e enrolado com o auxílio de um motor. O acionamento e giro desse motor também são controlados pelo sistema. Esse sistema é dotado de sinalizadores de falha.

Para armazenamento dos dados medidos, o sistema dispõe de 32 kB (quilobytes) de memória não-volátil para manutenção dos dados medidos independente da fonte de alimentação. Conta-se também com um relógio de tempo real, com calendário, para registro da data e do horário de medida (Faccin, Zuccolotto, Brito *et al*, 1996).

As múltiplas funções do sistema microcontrolado foram definidas e especificadas pelo projeto do inclinômetro com Sensores de Efeito Hall. Essas funções são necessárias para que seja possível executar a monitoração contínua das deformações da massa de solo em movimento no campo sem a necessidade de operador. Conforme Faccin, Zuccolotto, Brito *et al* (1996), o sistema inicia o processo de aquisição de dados automaticamente em horários programados. O torpedo é posicionado na profundidade desejada, alimentando e, decorrido o tempo de estabilização do sinal (cerca de 1 a 2 minutos), são realizadas 64 leituras de cada um dos valores de inclinação. Essas leituras são feitas nas direções “X e Y” correspondentes aos transdutores superior e inferior. A média de cada uma dessas leituras é armazenada, juntamente com a data, o horário da aquisição e a profundidade na qual as leituras foram feitas. Este processo é repetido para um conjunto de profundidades também programadas, entre 10 e 20 posições.

Após o torpedo é recolhido ao topo do tubo e tem sua alimentação desligada. Em cada processo de aquisição, a tensão de alimentação dos sensores também é armazenada, uma vez que ela é fator interferente no resultado obtido. Ainda mais, o microcontrolador também realiza o monitoramento da tensão da bateria interrompendo o processo quando a mesma cair abaixo de um determinado valor. A corrente do motor e o tempo de deslocamento do torpedo também são variáveis importantes, e devido a isso monitoradas, pois através delas identifica-se um bloqueio do tubo guia que pode representar um colapso eminente no talude sob estudo.

A cada período de 15 ou 30 dias, o operador deve trocar a bateria de alimentação do sistema e recolher os dados armazenados. A partir da análise desses dados, procura-se identificar a amplitude do movimento monitorado. Caso se julgar conveniente, pode-se ainda reprogramar horários e/ou as profundidades de medida. Esse protótipo propicia a aquisição contínua dos dados substituindo o operador humano com vantagens em uma tarefa que, em certas ocasiões, pode possuir riscos (próximo ao evento da ruptura do talude).

Os dados de inclinação, profundidade e informações temporais associadas são armazenados diretamente em formato digital, podendo ser processados automaticamente por um microcomputador (Faccin, Zuccolotto, Brito *et al*, 1996).

6 CALIBRAÇÃO DO TORPEDO DO INCLINÔMETRO

O instrumento que está sendo desenvolvido nesse trabalho é um torpedo de inclinômetro com transdutores eletrônicos; portanto, para ser utilizado necessita ser calibrado em laboratório. Nesse capítulo, estão apresentadas as calibrações executadas nos transdutores com Sensores de Efeito Hall, instalados no torpedo, e os ajustes realizados nesses transdutores até a definição de seu comportamento. Essas calibrações simularam no laboratório, simplificadamente, as condições de trabalho desses transdutores em campo.

6.1 CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO DO TRANSDUTOR

No início desta pesquisa, conforme mencionado no item 5.4.1, foi fabricado um protótipo do transdutor em latão, possuindo a forma escolhida para o transdutor. O protótipo consistia, então, de um pórtico flexível com uma base fixa e outra móvel. Essas bases eram ligadas por duas lâminas flexíveis. Esse pórtico se deformava à medida que era submetido a uma inclinação. Os detalhes quanto à forma e funcionamento do transdutor foram comentados no item 5.4.2.

Dois Sensores de Efeito Hall foram colocados no transdutor. Esses sensores foram excitados com uma tensão de 8,0 V em corrente contínua. A tensão de saída dos sensores foi medida através de um voltímetro. Para calibrar o protótipo, a base fixa do transdutor foi colada a uma prancha de madeira. Essa prancha foi posicionada a várias inclinações. Em cada inclinação foram tomadas leituras da tensão de saída dos sensores.

A relação entre a variação do ângulo de inclinação da prancha com a variação da tensão de saída do transdutor era praticamente linear. Esse comportamento pode

ser observado no gráfico da figura 6.1. Concluiu-se, portanto, que o comportamento do protótipo foi satisfatório. Partiu-se, então, para a confecção do transdutor propriamente dito e do protótipo do torpedo.

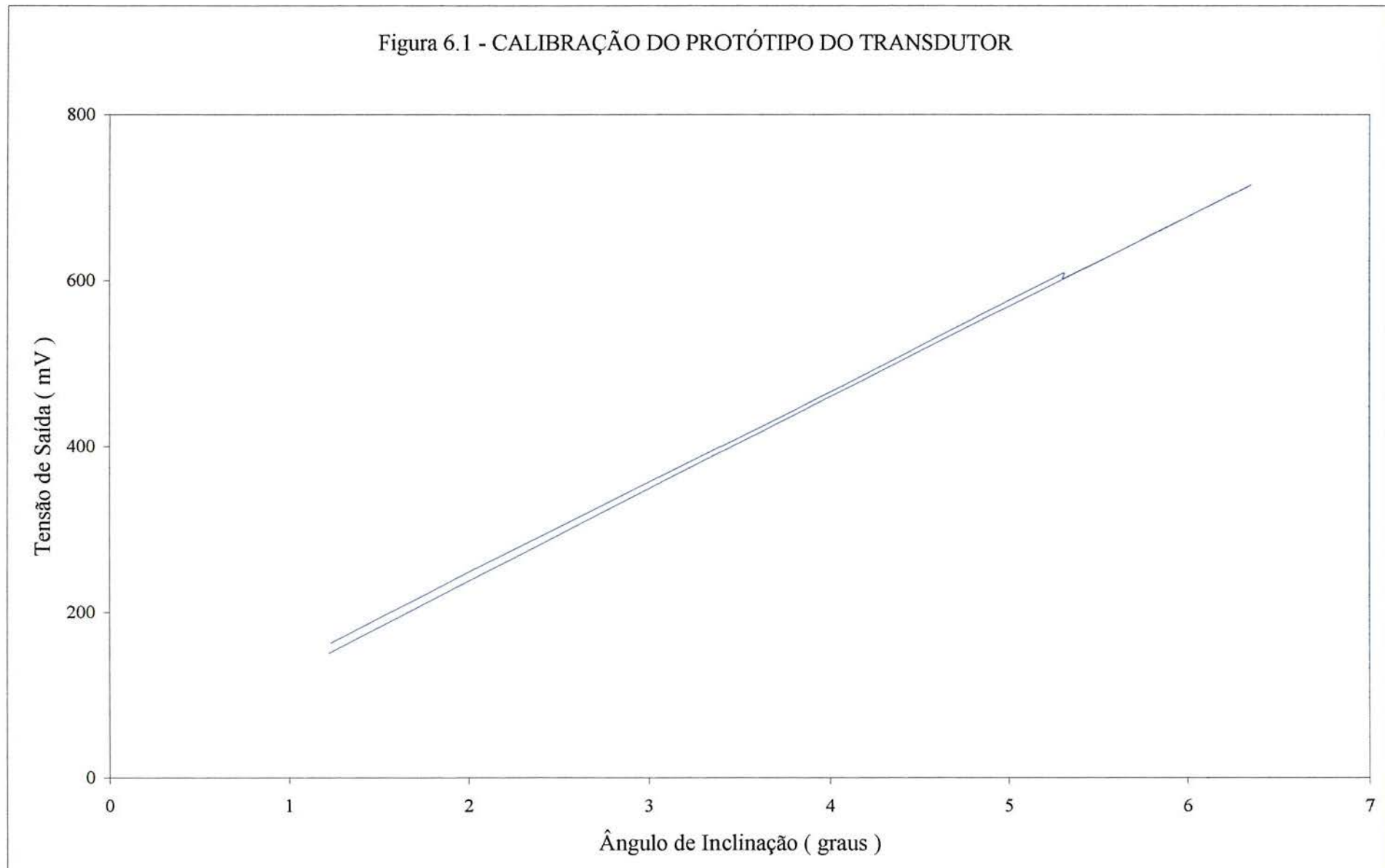
6.2 DESENVOLVIMENTO DO CALIBRADOR DO INCLINÔMETRO

A calibração do torpedo do inclinômetro com Sensores de Efeito Hall foi executada usando um pêndulo de madeira com aproximadamente 2,20 m de altura. Um eixo de aço engastado no topo de uma coluna do laboratório sustenta um par de rolamentos que estão fixados em ambas as faces do pêndulo, junto ao seu topo (ver fig. 6.2). Na parte inferior do pêndulo acopla-se o torpedo, que fica então sujeito à oscilação do pêndulo. Na extremidade inferior do pêndulo, uma agulha longa é fixada e cuidadosamente alinhada, para permitir a leitura do deslocamento horizontal do pêndulo através de uma régua que foi previamente posicionada e nivelada.

O torpedo, para ser acoplado ao pêndulo, apóia-se em uma base metálica que possui um furo circular por onde passa o pino metálico do torpedo. Uma porca rosqueada ao pino fixa o torpedo à base. Esta fixação permite orientar os transdutores em relação à direção de oscilação do pêndulo e, também, evita que o torpedo se movimente durante a calibração alterando a sua orientação.

O pêndulo foi executado em madeira para tornar o conjunto pêndulo, inclinômetro e contrapeso leve: a massa total do conjunto é de 15 kg. O engastamento do eixo no pilar tem dois objetivos fundamentais: suportar o peso do conjunto e evitar deformações que tirem o pêndulo da vertical. O pêndulo foi projetado para permitir uma boa precisão da leitura do ângulo; devido a isso o seu comprimento foi projetado como sendo o maior possível em função do espaço físico disponível no laboratório e para permitir ao operador fácil leitura da régua, conforme mostra a figura 6.3. Para se fazer a leitura da tensão de saída do torpedo em uma determinada inclinação, fixa-se o pêndulo nessa inclinação com o auxílio de uma corrente presa ao mesmo e à parede.

Figura 6.1 - CALIBRAÇÃO DO PROTÓTIPO DO TRANSDUTOR



A régua de referência permite avaliar o deslocamento horizontal da agulha na extremidade do pêndulo. Para isso a régua possui duas escalas milimétricas de 600 mm de extensão. A régua foi colocada em uma tábua com um suporte móvel apoiado no chão, como pode ser observado na figura 6.3. Este suporte foi posicionado e nivelado com o auxílio de um prumo fixado ao eixo do pêndulo. Isto permitiu o alinhamento do centro da escala com o eixo do pêndulo. Para evitar erros de paralaxe, foi colocado um pequeno espelho acima das escalas, sendo que a posição de leitura é determinada pela superposição entre a agulha e sua imagem no espelho. A diferença de altura entre o eixo do pêndulo e as escalas é de 114,5 cm ou 117,5 cm dependendo do lado da escala utilizado.

O valor do ângulo de inclinação do sensor simulado pelo pêndulo é calculado a partir do valor da tangente. A tangente é determinada pela razão entre a leitura da escala e a diferença de altura entre o eixo do pêndulo e a escala. A faixa de variação do ângulo, a qual o torpedo foi submetido durante as calibrações, foi de -15° a $+15^\circ$. A precisão de leitura do ângulo através da régua foi de $0,4^\circ$.

Segundo o Método Sugerido para Monitorar Movimentos de Rocha Usando Inclínômetros e Tiltímetros, apresentado pela ISRM (1977), o calibrador de um inclinômetro deve ter um dispositivo independente de medição angular com precisão melhor que $0,01^\circ$. O calibrador aqui desenvolvido não alcança essa precisão de medição angular, entretanto, para os propósitos dessa pesquisa, que é testar o bom desempenho do transdutor do inclinômetro intermitente, esse calibrador forneceu leituras angulares satisfatórias.

A faixa angular de calibração adotada por Green (1974), em sua simulação de laboratório, foi de $+5^\circ$ a -5° . Suas calibrações foram executadas em incrementos de 1° e precisão de $\pm 0,01^\circ$ em qualquer incremento. A calibração do mini-inclinômetro UBC, citada por Ortigão (1993), foi feita dentro de uma faixa de variação angular de $+20^\circ$ a -20° . Essa calibração foi executada em incrementos de 2° . A faixa de variação angular utilizada nesse trabalho se situa, portanto, entre as faixas de variação apresentadas por Green (1974) e Ortigão (1993).

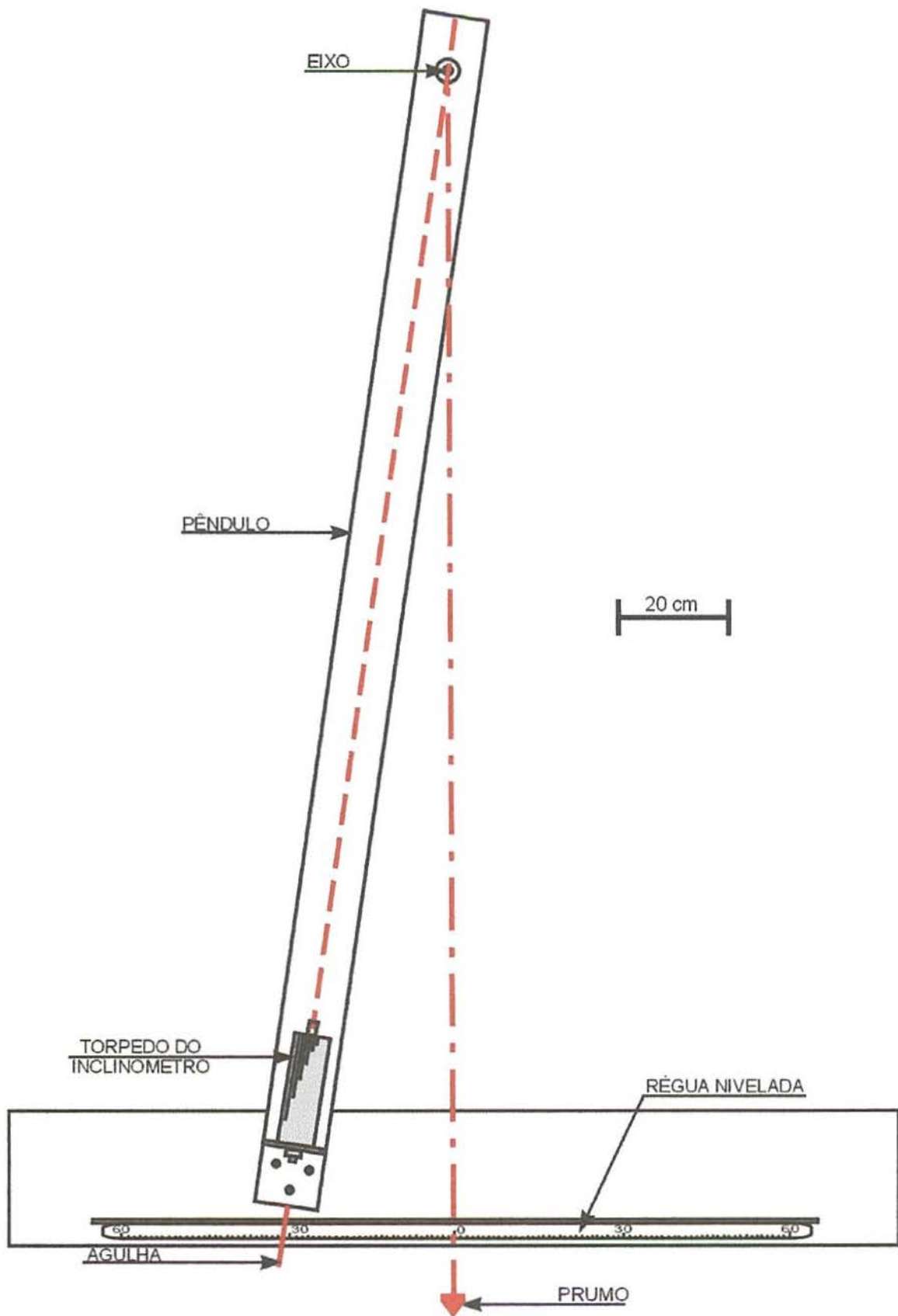


Figura 6.2 - Calibrador do inclinômetro.

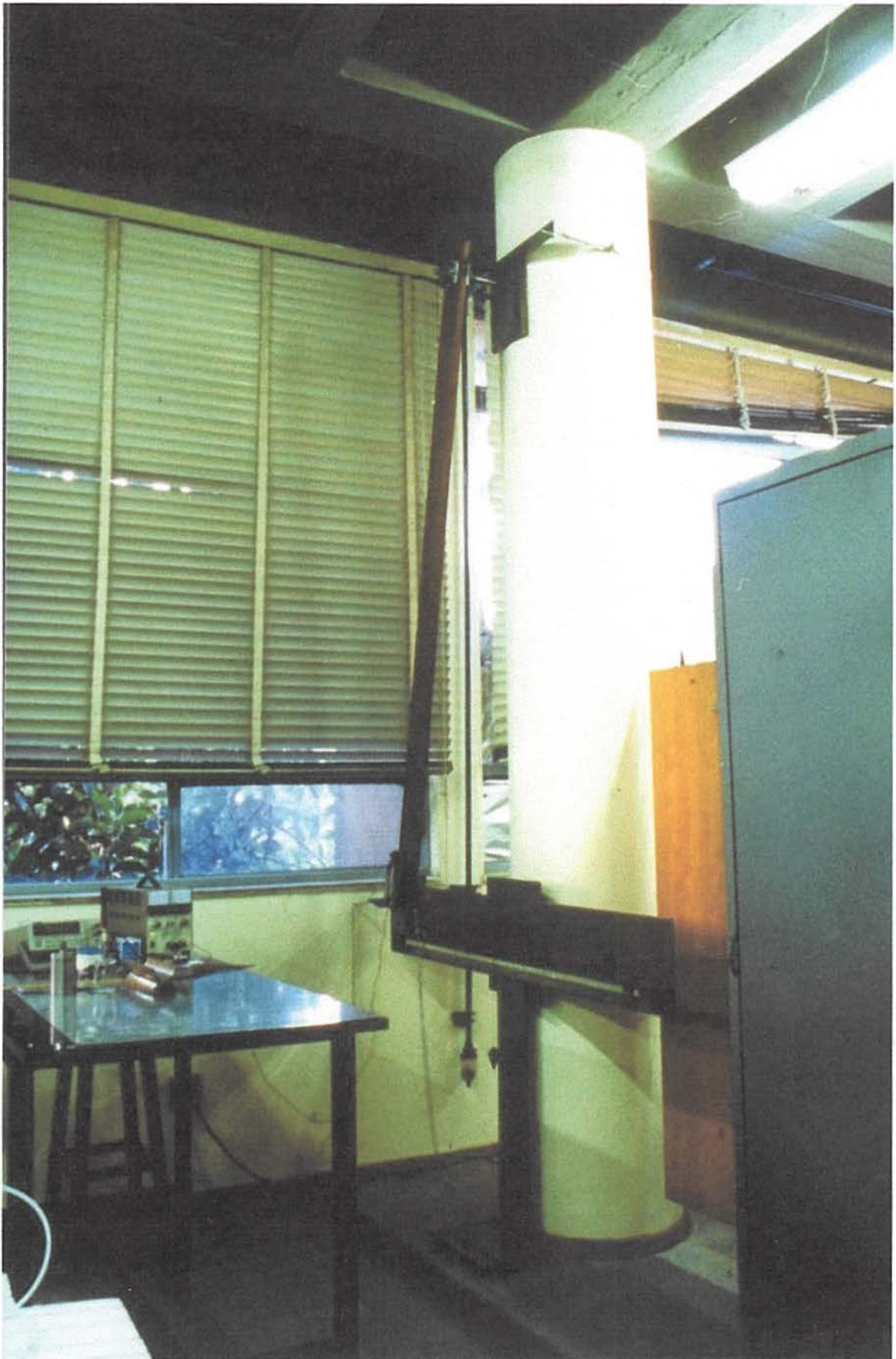


Figura 6.3 - Foto do calibrador do inclinômetro.

6.3 PRIMEIRAS CALIBRAÇÕES DO INCLINÔMETRO

O torpedo possui dois transdutores, um na parte superior e outro na inferior. Ambos transdutores estão posicionados de modo a permitir leituras em duas direções perpendiculares ao eixo do torpedo. Cada transdutor é munido de dois Sensores de Efeito Hall. Portanto, se faz necessária a calibração do transdutor superior e do inferior separadamente.

Considerando que a orientação de campo deve ser observada durante a calibração, de agora em diante será denominado transdutor superior o transdutor a ser posicionado nesta situação no campo, sendo definido pela saída do cabo alimentador e condutor de sinais. O segundo transdutor, logicamente, será denominado inferior.

As primeiras calibrações foram feitas em fevereiro de 1995. O primeiro passo foi estabelecer uma rotina de calibração e um método de cálculo. Cada transdutor foi calibrado a partir da origem – o pêndulo em repouso formando um ângulo de 0° com a vertical. Com o pêndulo em repouso, o torpedo foi apoiado no suporte adequado. O transdutor que estava posicionado para cima era orientado de forma que o pórtico móvel se deformasse na mesma direção em que oscilava o pêndulo. Para este posicionamento, existem marcas externas na peça central do torpedo que indicam a orientação do transdutor mesmo que o torpedo esteja fechado. A orientação do torpedo foi mantida durante a calibração através da sua fixação no suporte, com o auxílio de uma porca atarraxada ao pino central existente nas tampas de fechamento do torpedo.

O par de Sensores de Efeito Hall de cada transdutor era excitado com uma tensão de 8,0 V CC. Essa tensão foi gerada pela fonte de corrente contínua citada no item 5.4.6. A mesma fonte foi utilizada para todas as calibrações de ambos os transdutores do torpedo. A tensão de saída do transdutor era medida pelo multímetro digital citado no item 5.4.6. Esse multímetro também foi utilizado em todas as calibrações.

Nas calibrações, o ângulo de inclinação imposto ao torpedo pelo pêndulo, foi comparado com a tensão de saída do transdutor. As primeiras calibrações mostraram que a relação entre o ângulo de inclinação e a tensão de saída era linear. Esse comportamento era esperado por se estar usando Sensores de Efeito Hall com a configuração citada no item 5.3.

Um dos primeiros problemas detectados foi a perturbação das leituras devido à passagem da fiação de entrada e saída dos sensores que, vez por outra, encostava-se ao pórtico flexível impedindo sua livre deformação. A fiação foi, portanto, fixada e desviada do espaço destinado à movimentação do pórtico.

6.4 PROBLEMAS DE HISTERESE E INSTABILIDADE

Uma das principais dificuldades encontradas, durante a calibração dos transdutores, foi a histerese. Apesar da linearidade da calibração, o valor das leituras para uma determinada inclinação não era o mesmo. Também foi observado que, mesmo sem alterar a inclinação do torpedo, as leituras de tensão de saída não se mantinham as mesmas ao longo do tempo.

Nas calibrações, o pêndulo progressivamente impunha ao torpedo ângulos de inclinação crescentes até o valor aproximado de 15°. Posteriormente, decrescia-se essa inclinação retornando a posição de equilíbrio do pêndulo. Em seguida, executava-se o mesmo processo no sentido oposto – inclinava-se o pêndulo para o outro lado, impondo ao torpedo ângulos de inclinação crescentes no outro sentido até o valor aproximado de 15°. Finalmente, decrescia-se a inclinação retornando pela segunda vez a posição de equilíbrio do pêndulo.

Fixando-se em um determinado ângulo de inclinação, no desenvolvimento da calibração, foi constatado que o valor da tensão de saída do transdutor não era o mesmo na subida e na descida do pêndulo. Existia, portanto, uma variação significativa do valor da tensão devido à deformação do transdutor. Essa diferença entre duas leituras de tensão, uma quando a inclinação está crescendo e a outra quando está decrescendo, é denominada histerese. Essa diferença era encontrada ao longo de todo o processo de calibração. Esse

fenômeno pode ser observado no gráfico da figura 6.4. Um bom transdutor deve possuir histerese mínima. Essa histerese é avaliada a partir da diferença entre as tensões de saída do transdutor para um mesmo ângulo de inclinação.

Em consequência da histerese, o valor da tensão de saída a 0° também não se mantinha constante. Quando a calibração era iniciada, o pêndulo em equilíbrio possuía um valor de tensão, e começava a sua movimentação em um sentido. Depois do pêndulo chegar aproximadamente na inclinação de 15° , o seu sentido de movimentação era invertido. No meio da calibração, quando o inclinômetro passava pelo ângulo de 0° e o sentido de movimentação do pêndulo estava invertido, o transdutor mostrava um segundo valor de tensão de saída. Finalmente, quando o pêndulo se movimentava novamente no sentido de movimentação inicial, após passar pelos 15° opostos, e retornava ao equilíbrio, marcando o final da calibração, o transdutor apresentava um terceiro valor de tensão de saída diferente dos outros dois. Portanto, o transdutor não possuía estabilidade do zero.

A vinculação entre os blocos metálicos e as vigas finas do pórtico flexível do transdutor foi feita por meio de compressão e colagem com adesivo epóxi. Através das primeiras calibrações, percebeu-se que esse adesivo possibilitava deformações plásticas do pórtico, caracterizadas pela histerese durante a calibração.

Foi realizado com o transdutor um teste de estabilidade de leitura, para observar seu comportamento e a provável influência das deformações plásticas no pórtico do transdutor. O pêndulo, com o transdutor instalado, foi mantido em uma inclinação fixa e diversas leituras da tensão de saída foram feitas com o passar do tempo. Foi observado, então, que as leituras não eram estáveis com o decorrer do tempo. Atribuiu-se esse comportamento também as deformações plásticas do pórtico do transdutor. Esse fenômeno, que está apresentado na tabela 6.1, é denominado de instabilidade de leitura.

A solução encontrada foi fazer o adesivo passar por um processo de cura, para torná-lo mais rígido. Acreditava-se que, tornando o adesivo mais rígido, as deformações plásticas deixariam de ser significativas deixando de influenciar as leituras do transdutor. Este processo está descrito nos itens abaixo citados:

- a) Colocou-se o torpedo dentro de uma estufa desligada;
- b) Regulou-se o termostato da estufa para a temperatura de 100° C, deixando a estufa ligada nessa condição por 1 h;
- c) Desligou-se a estufa, após esse período, mantendo o torpedo em seu interior por 2 h. Abriu-se então uma fresta para possibilitar o esfriamento lento, portanto evitando o choque térmico da cura;
- d) Após abriu-se a estufa, deixando o torpedo equilibrar sua temperatura com o ambiente do laboratório.

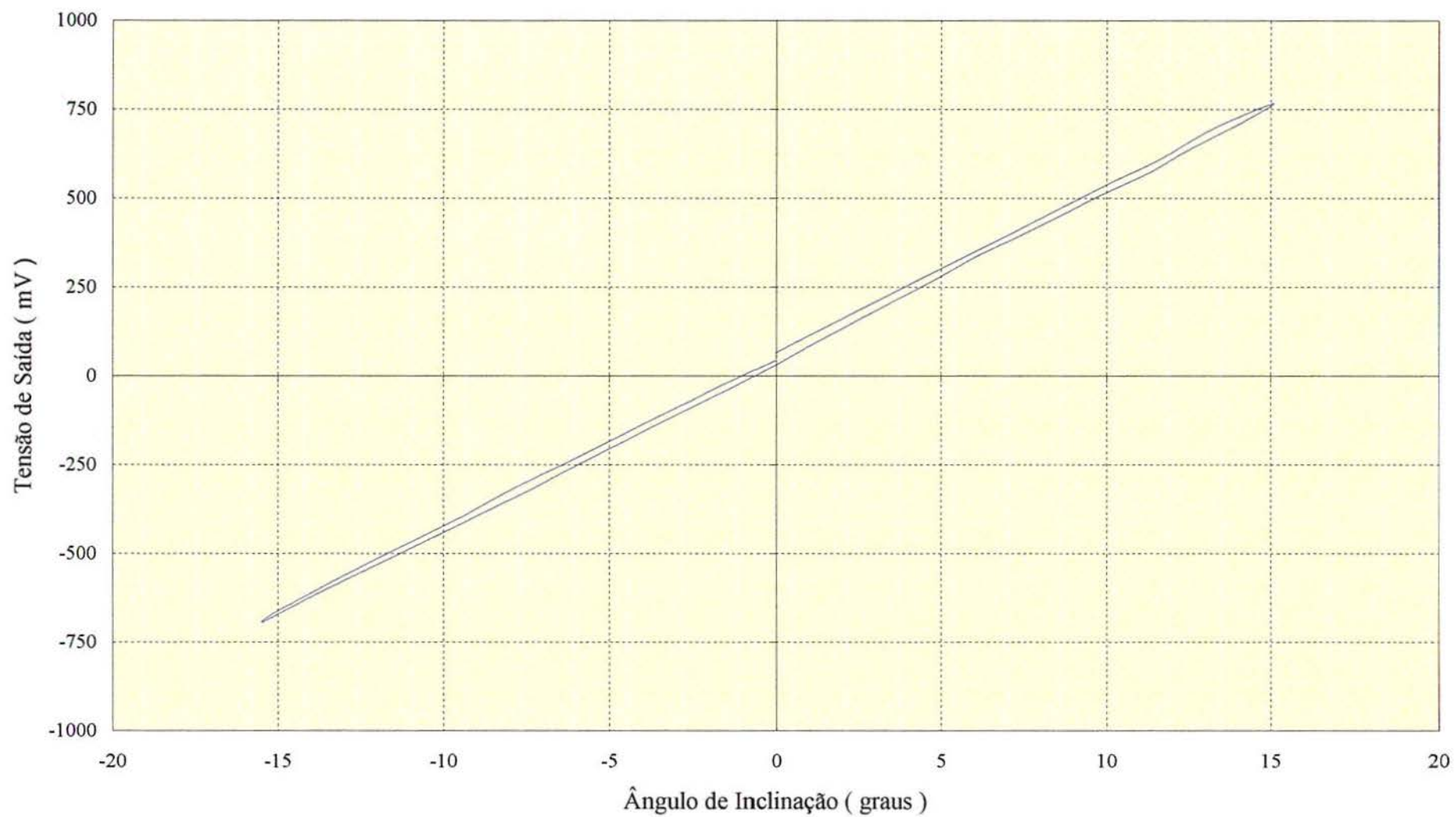
Estando o processo de cura completado, levou-se o torpedo para novo teste de estabilidade observando o comportamento do transdutor. Foram feitos 3 estágios de cura praticamente iguais, onde se observou uma considerável diminuição da instabilidade. Portanto, pode-se afirmar que a instabilidade estava realmente associada às deformações plásticas que o adesivo sofria antes de ser curado. E, provavelmente, a histerese também estava associada a essas deformações plásticas como veremos nas próximas calibrações.

Pode-se observar a melhora da estabilidade das leituras do transdutor com a seqüência de curas a partir da tabela 6.1. Nesta tabela estão apresentadas as variações das leituras de saída do transdutor antes e após o processo de cura.

Tabela 6.1 - Avaliação da instabilidade através da variação da tensão de saída com o tempo.

TESTE DE ESTABILIDADE DAS LEITURAS COM O TEMPO				
TEMPO (min)	TENSÃO DE SAÍDA DO TRANSDUTOR (mV)			INCLIN. DO TRANSD. (°)
	adesivo s/cura	adesivo c/1 cura	adesivo c/2 curas	
0	-134,0	-132,0	-116,4	10,3
4	-136,9	-128,4	-116,6	10,3
8	-151,1	-125,8	-116,6	10,3
12	-152,5	-124,4	-116,7	10,3
16	-153,8	-122,8	-116,7	10,3

Figura 6.4 - CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR INFERIOR COM HISTERESE



6.5 TROCA DE SENSORES DE EFEITO HALL

Mesmo depois de executado o processo de cura do adesivo, o transdutor inferior não obteve a mesma melhora de desempenho que o superior durante as calibrações. Foi feito novamente um teste de estabilidade de leitura, posicionando o pêndulo em uma inclinação fixa e tomando leituras ao longo do tempo. Constatou-se que continuava a ocorrer variação da leitura da tensão com o tempo.

Passou-se a suspeitar de algum efeito de superaquecimento dos Sensores de Efeito Hall. Foram feitas duas calibrações adicionais, uma com a fonte alimentadora ligada continuamente e outra com a fonte sendo ligada e desligada a cada duas leituras. A diferença de comportamento das diferentes leituras não foi significativa; não se confirmando, portanto, a suspeita inicial.

A solução adotada foi substituir os Sensores de Efeito Hall do transdutor inferior; possivelmente defeituosos. Para isso foi necessário desmontar o pórtico flexível deste transdutor. Depois da montagem, com novos sensores, foi repetido o processo de cura do adesivo.

6.6 CALIBRAÇÕES SATISFATÓRIAS

Após terem sido executadas as atividades citadas nos itens anteriores, os transdutores do torpedo foram novamente calibrados. Finalmente, uma calibração satisfatória foi obtida para cada um dos transdutores. A histerese encontrada nessas calibrações foi mínima, confirmando a importância da cura do adesivo epóxi. Foram feitas, a partir deste momento, repetidas calibrações, sendo todas essas consideradas satisfatórias. Os resultados de duas calibrações, uma feita no transdutor superior e outra no transdutor inferior, estão apresentados nas figuras 6.5 e 6.6.

Tendo sido o resultado das calibrações considerado satisfatório, foram definidas algumas características de calibração dos transdutores. A escala completa de saída

possui uma amplitude de 1,6 V, para uma faixa de variação de ângulo de inclinação de -15° a +15°. A sensibilidade encontrada para o transdutor inferior foi de 0,81 mV/° (milivolt por minuto de grau). Para o transdutor superior, foi encontrada a sensibilidade de 0,93 mV/°.

Conforme pode ser observado nas figuras 6.5 e 6.6, a histerese após a cura foi de 0,70 % para o transdutor inferior e de 1,05 % para o transdutor superior. A não linearidade do transdutor superior foi de 1,29 %, enquanto para o inferior foi somente de 0,32 %. A estabilidade do zero foi de 0,49 % para o transdutor inferior e de 1,11 % para o transdutor superior. Portanto pode-se concluir que o transdutor inferior é de melhor qualidade que o superior, mas suas características são da mesma ordem de grandeza e consideradas satisfatórias para um protótipo de transdutor fabricado em laboratório.

Tabela 6.2 - Resultado final das características de calibração dos transdutores.

CARACTERÍSTICAS DE CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES				
TRANSDUTOR	SENSIBILIDADE mV/°	HISTERESE %	NÃO LINEARIDADE %	ESTABILIDADE DO ZERO %
superior	0,93	1,05	1,29	1,11
inferior	0,81	0,70	0,32	0,49

Figura 6.5 - CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR SUPERIOR

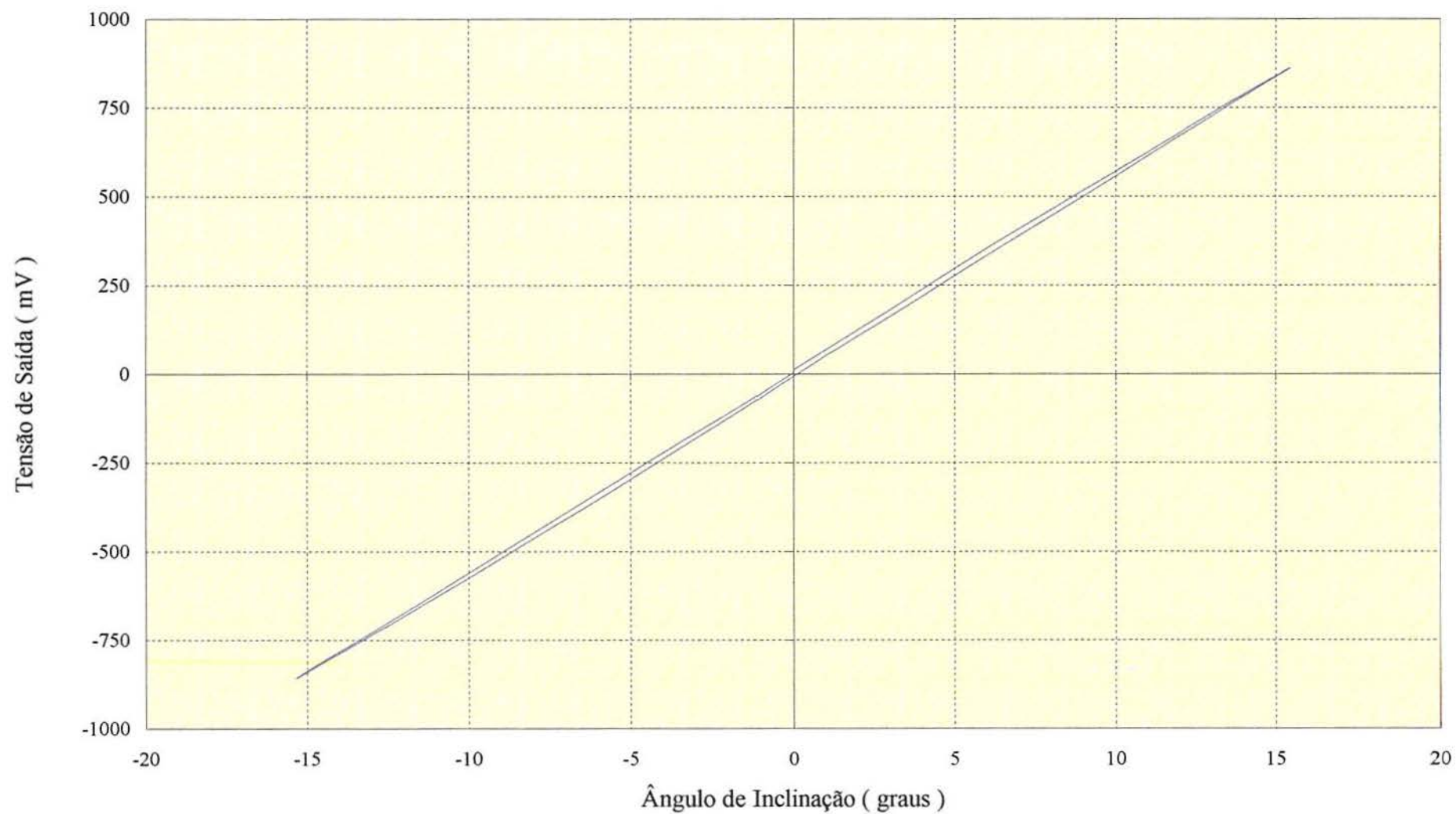
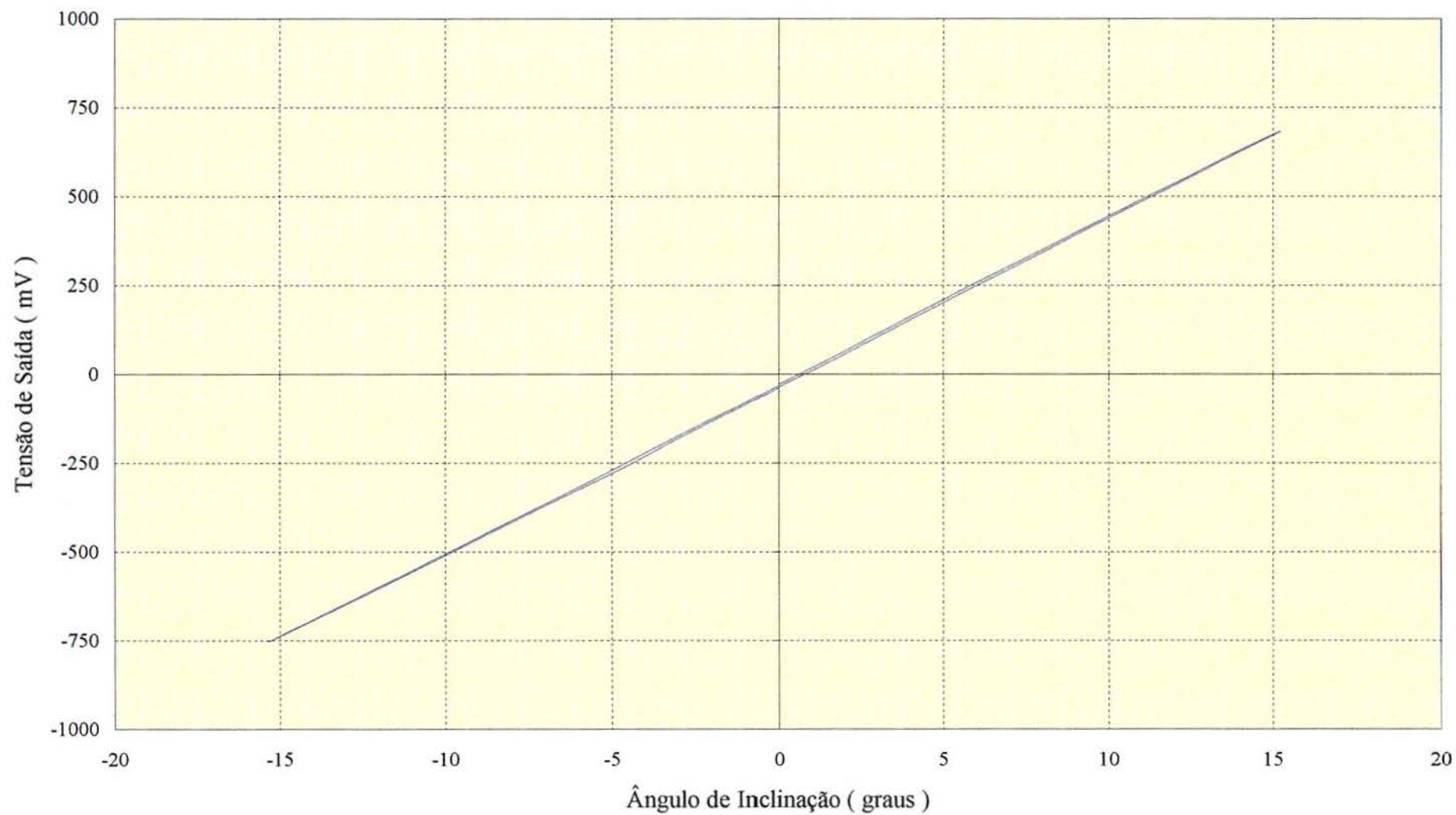


Figura 6.6 - CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR INFERIOR



6.7 EQUAÇÕES DEFINIDAS PELAS CALIBRAÇÕES

Os resultados finais das calibrações dos transdutores superior e inferior são as equações que relacionam a tensão de saída, em milivolt (mV), com a inclinação sofrida pelo transdutor em graus (°). Para essa definição foram utilizadas as calibrações consideradas satisfatórias, apresentadas no item 6.6, devido as características de calibração obtidas. O comportamento da relação entre tensão de saída e ângulo de inclinação é linear, como já citado no item 6.3, portanto as equações a serem ajustadas são retas. Para esse ajuste foram realizadas regressões lineares utilizando os recursos da planilha eletrônica denominada EXCEL. Essa planilha eletrônica pertence ao Microsoft Office, software desenvolvido pela empresa Microsoft.

A calibração do transdutor superior, apresentada na figura 6.5, foi ajustada pela equação de reta apresentada a seguir. Esse ajuste possui um coeficiente de regressão R^2 igual a 0,9997, portanto muito próximo de 1 mostrando, também, a qualidade do ajuste e a linearidade da função.

$$\alpha = 0,01773 U + 0,0234$$

Onde “U” é a tensão de saída do transdutor em mV, e “ α ” é o ângulo de inclinação imposto ao transdutor em graus.

Já a calibração do transdutor inferior, apresentada na figura 6.6, foi ajustada pela equação de reta apresentada abaixo. Esse ajuste possui um coeficiente de regressão R^2 igual a 0,9999, portanto muito próximo de 1 mostrando a qualidade do ajuste e a linearidade da função.

$$\alpha = 0,02112 U + 0,7171$$

Pode-se observar que o coeficiente de regressão mais próximo de 1, pertencente ao transdutor inferior, corresponde a não linearidade menor. Enquanto que o

coeficiente de regressão do transdutor superior, que é um pouco menos próximo de 1, corresponde a uma não linearidade um pouco maior. Os resultados estão portanto coerentes.

6.8 CALIBRAÇÕES E SIMULAÇÕES DE OUTROS AUTORES

A necessidade de estudar e analisar o comportamento efetivo de torpedos de inclinômetro, levando em conta as características que mais influenciam as medidas de campo, incentivou Devin *et al* (1988) a desenvolver um equipamento experimental com o qual uma série de condições reais de uso pode ser simulada. Pode-se citar como condições o furo inclinado com o eixo reto ou então curvo, a presença ou não de água no tubo guia e as diferentes temperaturas. Um ou mais tubos guias devem estar disponíveis, cuja forma deve ser conhecida: o ângulo espiral, a deformação e desvio da vertical.

A solução adotada foi à instalação de 3 tubos guias de inclinômetro em um tubo de aço de 13,6 m de comprimento que serviu como uma estrutura de suporte. No meio do cano foram cimentados 3 tubos guias de alumínio. Um desses tubos guias possuía um ângulo de espiralamento total de 30° em 13 m de extensão. Os outros não eram espiralados. Esse aparelho foi montado dentro de uma torre pré-existente. O deslocamento e a deformação do tubo foram executados dentro do plano vertical que passava no centro da torre.

Uma dobradiça tornou possível para o cano de aço girar no seu próprio eixo por 360°. O deslocamento da base do cano foi feito em somente uma direção a partir da posição vertical pelo plano central da torre. Na base do cano foi montada uma viga guia que permitia um deslocamento máximo de 2,40 m correspondente a um desvio da vertical de 10° (Devin *et al*, 1988).

Green (1974) executou seu trabalho de calibração, já mencionado no item 6.2, fazendo também uma simulação em laboratório instalando dois tubos guias de 27 m colocados no poço de uma escada. O comprimento de cada tubo guia testado foi disposto no poço, sendo rigidamente fixado a um tubo metálico. O deslocamento horizontal foi imposto

no plano N-S. A monitoração do tubo guia foi executada antes e depois da sua movimentação, fazendo leituras com cada instrumento sendo movimentado para cima e para baixo no tubo guia. O deslocamento verdadeiro do tubo guia foi obtido das medidas da referência de um par de fios de chumbo baixados lateralmente no poço da escada.

Essas calibrações foram executadas com o objetivo de estudar a estabilidade dos inclinômetros com o tempo e a temperatura. Uma série de ensaios de laboratório foi conduzida, então, por Green (1974) em dois sistemas inclinômetro:

- a) Dois inclinômetros 200 B Series Wilson da Slope Indicator;
- b) Dois inclinômetros Mark 1 da Soil Instrument Inclinometer.

Todos os testes mostraram nenhuma variação significativa na faixa de calibração com o tempo. Os inclinômetros da Slope Indicator mostraram uma calibração muito linear e sem histerese. Os inclinômetros Mark 1 apresentaram uma calibração não linear sem histerese. O desvio da linha reta média foi de aproximadamente 5 %, mas já que não foi fácil considerar a não linearidade na análise, valores médios medidos foram utilizados nos deslocamentos computados (Green, 1974).

Pode-se constatar, então, que nem todos os inclinômetros estudados por Green (1974) possuíam calibrações lineares. O inclinômetro com Sensores de Efeito Hall, desde o estudo do primeiro protótipo, apresentava transdutores com uma calibração linear. Esses transdutores foram aprimorados até se conseguir uma calibração linear com pouca histerese; sendo, portanto, um resultado realmente satisfatório.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Estão apresentadas a seguir as conclusões dessa dissertação e as recomendações e sugestões para o prosseguimento dessa linha de pesquisa.

7.1 CONCLUSÕES

Os transdutores do inclinômetro com Sensores de Efeito Hall são capazes de funcionar como sensor de inclinação. Esses transdutores podem ser utilizados em um inclinômetro fixo ou em um inclinômetro intermitente. Com algumas alterações, os transdutores também podem ser utilizados em um tiltímetro.

Para o inclinômetro com Sensores de Efeito Hall, desenvolvido nessa dissertação, a relação entre a inclinação do torpedo e a tensão de saída do transdutor possui um comportamento linear.

Os resultados das calibrações dos transdutores superior e inferior do torpedo são satisfatórios. Para ambos os transdutores foram obtidas calibrações lineares com pouca histerese e um zero estável.

Finalmente, a principal conclusão dessa dissertação é que a utilização de transdutores com Sensores de Efeito Hall em instrumentação de campo é promissora.

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

O torpedo do inclinômetro desenvolvido é ainda um protótipo, mas, prosseguindo com seu estudo, poderá funcionar como torpedo para um inclinômetro fixo ou para o inclinômetro intermitente proposto nesse trabalho.

Para o prosseguimento da linha de pesquisa sugere-se a conclusão o desenvolvimento do torpedo do inclinômetro. Duas experiências são consideradas essenciais para testar o desempenho do torpedo. Primeiro o teste da estanqueidade do torpedo e, segundo o estudo do comportamento do torpedo quanto à variação de temperatura.

Também é sugerida a simulação do comportamento do torpedo dentro de um tubo guia em laboratório, ou seja, esse tubo guia deve ser submetido a deslocamentos laterais. Posteriormente, o torpedo deve ser levado para campo para ser utilizado em medições reais de deformação subsuperficiais.

O inclinômetro intermitente necessita que seu sistema mecânico de funcionamento, que permitirá sua descida e ascensão no tubo guia, seja plenamente desenvolvido. Finalmente, pode-se sugerir que o sistema automático de aquisição de dados seja testado tanto na simulação de laboratório como nos trabalhos de campo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALDUCCI, M.; CUSTODI, A. (1989) Use of Fixed Inclinometers in the Monitoring of Landslides. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12, 1989, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rotterdam, A. A. Balkema, vol. 3, p. 1535-1538.
- BARTON, M. E.; COLES, B. J. (1984) Rates of Movement of Soil Slopes in Southern England Using Inclinometers and Surface Peg Surveying. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIELD MEASUREMENTS IN GEOMECHANICS, 1, 1983, Zurich. **Proceedings...** Rotterdam, A. A. Balkema, p. 609-618.
- BICA, A. V. D. (1991) **A Study of Free Embedded Cantilever Walls in Granular Soil.** Guildford, 1991, 508 p. Tese de Doutorado. University of Surrey.
- BICA, A. V. D.; CLAYTON, C. R. I. (1989). Hall Effect Instrumentation for Stress and Force Measurements. **Journal of Physics Scientific Instruments**, vol. 22, p. 548-551.
- BICA, A. V. D.; BRESSANI, L. A.; CLAYTON, C. R. I.; SOARES, J. M. D.; FORMOSO, M. T. (1994) Algumas Aplicações de Sensores de Efeito Hall em Instrumentação Geotécnica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 10, 1994, Foz do Iguaçu. **Anais...** ABMS, vol. 2, p. 327-334.
- BONNARD, C. (1984) Determination of Slow Landslide Activity by Multidisciplinary Measurement Techniques. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIELD MEASUREMENTS IN GEOMECHANICS, 1, 1983, Zurich. **Proceedings...** Rotterdam, A. A. Balkema, p. 619-637.

- BRESSANI, L. A. (1990) **Experimental Properties of Bonded Soils**. London, 1990, 459 p.
Tese de Doutorado. Imperial College of Science, Technology and Medicine.
- BRESSANI, L. A.; BICA, A. V. D.; PINHEIRO, R. J. B.; FERREIRA, P. M. V.; RIGO, M. L. (1997) Mechanisms of Instability of a Colluvium Slope in Teutônia / RS. In: PAN-AMERICAN SYMPOSIUM ON LANDSLIDES (2) E CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 2, 1997. Rio de Janeiro. **Anais...** ABMS, ABGE, ISSMGE. vol. 1, p. 261-267.
- CLAYTON, C.R.I.; KHATRUSH, S. A. (1986) A New Device for Measuring Local Axial Strains on Triaxial Specimens. **Géotechnique**, vol. 36, n. 4, p. 593-597, dez.1986.
- CLAYTON, C.R.I., KHATRUSH, S. A.; BICA, A. V. D.; SIDDIQUE, A. (1989) The Use of Hall Effect Semiconductors in Geotechnical Instrumentation. **Geotechnical Testing Journal**, Philadelphia, ASTM, vol. 12, nº 1, p. 69-76, mar. 1989.
- COOPER, M. R.; GRANT, D. I. (1989) Instrumentation Systems for Experimental Cut Slope at Selborne, Hampshire - Design and Initial Performance. In: GEOTECHNICAL INSTRUMENTATION IN PRACTICE: Purpose, Performance and Interpretation, 1989, Nottingham, **Proceedings...** London, Thomas Telford, p. 165-176
- DEERE, D. U.; PATTON, F. D. (1971) Slope Stability in Residual Soils In: PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 4, 1971, San Juan. **Proceedings...** New York, ASCE, vol. 1, p. 87-170.
- DEVIN, P. E.; PEZZETTI, G.; RICCARDI, C.; TOMMASI, P. (1988) Assessing the Precision of Inclinometric Measures by Means of an Experimental Apparatus. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 15, 1988, Lausanne. **Proceedings...** Rotterdam, A. A. Balkema, vol. 1, p. 393 - 398.
- DUNNICLIFF, J. (1988) **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. New York, Wiley-Interscience Publication., 497p.

- FACCIN, M. G.; ZUCCOLOTTO, M.; BRITO, R. M.; FORMOSO, M. T.; BICA, A. V. D. (1996) Instrumento Digital Automático para Medição de Deformações do Solo: Inclínômetro. In: SEMINÁRIO DE INSTRUMENTAÇÃO, 11, 1996, Salvador. **Anais...** Instituto Brasileiro do Petróleo, p. 167-172.
- GUIDICINI, G.; WOLLE, C. M.; MORUZZI, C. (1977) **Um Caso de Instrumentação de Maciços na Rodovia dos Imigrantes**. São Paulo, IPT, 1977. 21p. (Publicação nº 1070) [Texto datilografado]
- GREEN, G. E. (1974) Principles and Performance of Two Inclinometers for Measuring Horizontal Ground Movements. In: SYMPOSIUM ON FIELD INSTRUMENTATION IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, 1974, London. **Proceedings...** London, Lecturer in Soil Mechanics, Imperial College, p. 166-179.
- HANNA, T. H. (1985) **Field Instrumentation in Geotechnical Engineering**. Clausthall, Ed. Transtech. (Transtech Series on Rock and Soil Mechanics, 10).
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1977) Suggested Methods for Monitoring Rock Movements Using Inclinometers and Tiltmeters. **Rock Mechanics**, 1977, vol. 10, n 1 – 2.
- ORTIGÃO, J. A. R.; CAMPANELLA, R. G.; CRAWFORD, C. B.; JACKSON, S. (1993) The UBC Mini-Inclinometer and Settlement System. **Solos e Rochas: Revista Brasileira de Geotecnia**. São Paulo, ABMS, ABGE., vol. 16, n. 2, p. 115-121, ago. 1993.
- SAPPA, M.; SAPPA, G. (1995) Observations on Inclinometer Measurements. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIELD MEASUREMENTS IN GEOMECHANICS, 4, 1995, Bergamo. **Proceedings...** Padova, S. G. Editoriali, p. 333 - 340.
- SCHILLING, G. H. (1993). **Influências e Correlações entre Pluviosidade Pluviométrica e Creep dos Solos Residuais do Escorregamento da Encosta do Soberbo**. Rio de Janeiro, 1993. Tese de Mestrado, COPPE / UFRJ.

SLOPE INDICATOR CO. (1990) **Geotechnical, Environmental and Structural Instruments.** Seattle, 1990 [Catálogo].

WILSON, S. D.; MIKKELSEN, P. E. (1978) Field Instrumentation. In: **Schuster, R. L.; Krizer, R. J. (ed.) Landslides: Analysis and Control.** Washington, Transportation Research Board/ National Academy of Sciences, p. 112-138. (Special Report, 176).

WOLLE, C. M.; HACHICH, W. (1989) Rain-Induced Landslides in Southeastern Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12, 1989, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rotterdam, A. A. Balkema, vol. 3, p. 1639-1642.

9 TRABALHOS PUBLICADOS

- BICA, A. V. D.; BRESSANI, L. A.; CLAYTON, C. R. I.; SOARES, J. M. D.; FORMOSO, M. T. (1994) Algumas Aplicações de Sensores de Efeito Hall em Instrumentação Geotécnica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 10º 1994. Foz do Iguaçu. **Anais...** ABMS, vol.2, p. 327-334.
- FORMOSO, M. T.; BICA, A. V. D.; BRESSANI, L. A.; CLAYTON, C. R. I. (1995) Development of Hall Effect Inclinometer. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIELD MEASUREMENTS IN GEOMECHANICS, 4, 1995, Bergamo. **Proceedings...** Padova, S. G. Editoriali, p. 511 - 517.
- FORMOSO, M. T.; BICA, A. V. D. (1995) Inclinômetro para Instalação em Taludes de Solos Coluviais. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE ENGENHEIROS GEOTÉCNICOS JOVENS, 2, 1995, Rio de Janeiro. **Anais...** p. 211 - 218.