USP

Campus de São Carlos

TUBULAÇÕES ENTERRADAS.
"O USO DA TRINCHEIRA INDUZIDA"

ORLANDO KANNABLEY MELOTTI

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS

Serviço de Pós-Gradução EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 03/10/02
Ass.:

TUBULAÇÕES ENTERRADAS.
"O USO DA TRINCHEIRA INDUZIDA"

Orlando Kannebley Melotti

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto

DEDALUS - Acervo - EESC
31100037135

São Carlos,
Estado de São Paulo
2002

EESC-USP

Class. TESE-EESC
Cutt. 3577
Tombo T0263/02
Sysno 1277227

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M528t

Melotti, Orlando Kannebley
Tubulações enterradas : o uso da trincheira induzida / Orlando Kannebley Melotti. -- São Carlos, 2002

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.
Área: Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto.

1. Condutos. 2. Trincheira induzida. 3. Falsa trincheira. 4. Redução de esforços. 5. Tubulações. 6. Instalação. 7. Aterro. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ORLANDO KANNEBLEY MELOTTI**

Dissertação defendida e julgada em 09-08-2002 perante a Comissão Julgadora:

Aprovado

Prof. Dr. **RODRIGO DE MELO PORTO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Assoc. **MOUNIR KHALIL EL DEBS**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Assoc. **BENEDITO DE SOUZA BUENO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Profa. Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico:

À minha esposa Heloísa, minhas filhas: Isabel, Marisa e Beatriz, aos meus Pais Eunice e Orlando meus irmãos César, Alexandre (em memória) e Lígia.

Agradecimentos

- A Deus, por ter me guiado e iluminado nos momentos mais difíceis.
- Ao Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto, pela excelente orientação fornecida e pelas palavras de motivação, durante a elaboração deste trabalho.
- Ao Prof. Dr. Benedito de Souza Bueno, pela contribuição decisiva para com este trabalho.
- Ao Engº Paulo Marcio Fernandes Viana, pelo exemplo e companheirismo.
- Aos meus colegas: Sidnei Teixeira, Carlos Vinícius Benjamim, Luiz Barás, Yuri Daniel Jatobá Costa e Karina Maria Lins Costa e Adilson dos Santos pelo incentivo e colaboração.
- A todos os professores, colegas e funcionários dos Departamentos de Hidráulica e Saneamento e de Geotecnia.
- Às empresas que patrocinaram o departamento de geotecnia, pois sem a colaboração importante e decisiva não poderíamos realizar este trabalho: AMANCO; BIDIM BBA NONWOVENS; G-TEC TUBOS LTDA; MACAFERRI; OBER INDUSTRIA E COMÉRCIO; OPP QUÍMICA e a SANSUY S.A.
- A EDRA DO BRASIL INDUSTRIA E COMÉRCIO LTDA. Pelo apoio incondicional.
- Aos IRMÃOS CARITÁ pela colaboração.
- Aos Senhores André de Reynier, Ciro A. S. Zanata, Luiz A. Pena, Paolo Antonio Polli e Rodrigo Scoda e João Luiz Trivelatto Jr. pelo apoio e colaboração.

SUMÁRIO

Lista de figuras i
Lista de tabelas vi
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos viii
Resumo xiii
Abstract xiv
1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Generalidades 1
1.2 Enfoque do problema 5
1.3 Propósito do trabalho 8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 10
2.1 Introdução 10
2.2 Revisão bibliográfica 10
2.3 Classificação 22
2.3.1 Condições hidráulicas 22
2.3.2 Rigidez 23
2.4 CLASSES DE INSTALAÇÃO 31
2.4.1 Instalação em valas ou trincheiras 31
2.4.2 Tipos de trincheiras 34
2.4.3 Instalação em aterros 36
2.4.4 Tubos instalados em trincheira induzida 43
3 MATERIAIS E MÉTODOS 49
3.1 Introdução 49
3.2 A caixa de reação 49
3.3 O alçapão 51

3.3.1 Aferição das medidas de deslocamento vertical do alçapão 53
3.4 O LVDT 54
3.5 Células de carga 55
3.6 Calibração dos instrumentos 57
3.7 Sistema Win5000 59
3.7.1 Entrada das conexões 59
3.8 Camada flexível 61
3.9 Sistema de lubrificação das paredes da caixa de reação 64
3.10 O solo 67
3.11 Chuva de areia 69
4 SISTEMATIZAÇÃO E ANALISE DOS DADOS 73
4.1 Introdução 73
4.2 Análise dos dados relativos ao ensaio de referência 76
4.2.1 Dados do ensaio de referência 77
4.3 Análise dos ensaios da série A 81
4.3.1 Ensaio número 01 81
4.3.1.1 Dados do ensaio 01 81
4.3.1.2 Tensões teóricas x tensões registradas 84
4.3.2 Ensaio número 02 86
4.3.2.1 Dados do ensaio 02 86
4.3.2.2 Tensões teóricas x tensões registradas 88
4.3.3 Ensaio número 03 90
4.3.3.1 Dados do ensaio 03 90
4.3.3.2 Tensões teóricas x tensões registradas 92
4.3.4 Ensaio número 04 94
4.3.4.1 Dados do ensaio 04 94
4.3.4.2 Tensões teóricas x tensões registradas 96
4.4 Análise dos ensaios da série B 98
4.4.1 Ensaio número 05 98
4.4.1.1 Dados do ensaio 05 98
4.4.1.2 Tensões teóricas x tensões registradas 102

4.4.2 Ensaio número 06 104
4.4.2.1 Dados do ensaio 06 104
4.4.2.2 Tensões teóricas x tensões registradas 106
4.4.3 Ensaio número 07 108
4.4.3.1 Dados do ensaio 07 108
4.4.3.2 Tensões teóricas x tensões registradas 111
4.4.4 Ensaio número 08 112
4.4.4.1 Dados do ensaio 08 112
4.4.4.2 Tensões teóricas x tensões registradas 114
4.5 Análise conjunta 116
4.5.1 Ensaios da série A 116
4.5.1.1 Tensões teóricas x tensões registradas 120
4.5.2 Ensaios da série B 122
4.5.2.1 Tensões teóricas x tensões registradas 124
4.5.3 Considerações práticas 125
4.5.3.1 Para a série A 125
4.5.3.2 Para a série B 126
5 CONCLUSÕES 127
6 SUGESTÕES 130
6.1 Introdução 130
6.2 Quanto à instalação da camada flexível 130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 132
OBRAS CONSULTADAS 136

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 Esquema de montagem da camada flexível na caixa de reação 09

FIGURA 2.1 Efeito do arqueamento no silo 10

FIGURA 2.2 Análise típica proposta por JANSEN 11

FIGURA 2.3 Experimento de TERZAGHI em silo com alçapão móvel 14

FIGURA 2.4 Arqueamento em areias (MCNULTY, 1964) 15

FIGURA 2.5 Distribuição de cargas em tubos flexíveis, segundo SPANGLER 16

FIGURA 2.6 Vala típica para instalação de tubos – determinação do coeficiente de vala 19

FIGURA 2.7 Comportamento de diversos tubos segundo sua rigidez relativa 28

FIGURA 2.8 Esquema do comportamento do tubo flexível enterrado 29

FIGURA 2.9 Esquema do comportamento do tubo rígido enterrado 30

FIGURA 2.10 Diagrama de forças para tubo instalado em trincheira estreita (YOUNG & TROT, 1984) 31

FIGURA 2.11 Curvas de relação entre H/B_d e C_d (BULSON, 1985) 33

FIGURA 2.12 Tubo instalado em vala com faces planas (ZAIDLER, 1983) . 34

FIGURA 2.13 Tubo instalado em vala com lados inclinados (ZAIDLER, 1983) 34

FIGURA 2.14 Tubo instalado em vala com sub vala (ZAIDLER, 1983)..... 35

FIGURA 2.15 Tubo instalado em condição de aterro (ZAIDLER, 1983) 36

FIGURA 2.16 Condutos com projeção positiva completa (BULSON, 1985) . 36

FIGURA 2.17 Condutos com projeção positiva incompleta (BULSON, 1985) 37
FIGURA 2.18 Notação para condição incompleta de vala (BULSON, 1985) 40
FIGURA 2.19 Relações entre H/B_c e $\sigma_v/\gamma.B_c$, para condutos salientes (BULSON, 1985) 42
FIGURA 2.20 Métodos construtivos de condutos enterrados (SLADEN & OSWELL, 1988) 44
FIGURA 2.21 Projeto final adotado (SLADEN & OSWELL, 1988) 47
FIGURA 2.22 Eixos de referência (VIANA & BUENO, 1988) 48
FIGURA 3.1 Vista em corte da caixa de reação, com indicação das alterações estruturais realizadas 50
FIGURA 3.2 Conjunto de barras prismáticas da caixa de reação 52
FIGURA 3.3 Novo anel divisor com dispositivo de indicação 52
FIGURA 3.4 Posicionamento do LVDT sob o alçapão 54
FIGURA 3.5 Gráfico de calibração do LVDT 55
FIGURA 3.6 Distribuição das células de carga no fundo da caixa de reação 55
FIGURA 3.7 Esquema de ligação para as células de carga 57
FIGURA 3.8 Adaptação das células de carga 57
FIGURA 3.9 Gráfico de calibração da célula 01 58
FIGURA 3.10 Gráfico de calibração da célula 01A 58
FIGURA 3.11 Gráfico de calibração da célula 01B 58
FIGURA 3.12 Gráfico de calibração da célula 02 58
FIGURA 3.13 Gráfico de calibração da célula 03 58
FIGURA 3.14 Painel traseiro do Win5000 59
FIGURA 3.15 Disposição geral da caixa de reação 61
FIGURA 3.16 Montagem da camada flexível fora da caixa de reação 62
FIGURA 3.17 Montagem da camada flexível da caixa de reação 63
FIGURA 3.18 Montagem da camada flexível – remoção das partes metálicas 63
FIGURA 3.19 Caixa de reação – visor de acrílico 63
FIGURA 3.20 Caixa de reação sem a trincheira flexível 64
FIGURA 3.21 Caixa de reação com trincheira flexível 65
FIGURA 3.22 Curva de distribuição granulométrica 67

FIGURA 3.23 Vista geral da caixa de reação com o carro de areia 69

FIGURA 3.24 Gráfico da densidade obtida pela técnica da compactação por chuva de areia 69

FIGURA 3.25 Carro de aplicação de areia – detalhe da abertura de dosagem antiga 70

FIGURA 3.26 Carro de aplicação de areia – esquema da nova abertura de dosagem 71

FIGURA 3.27 Carro de aplicação de areia detalhe do novo sistema de aplicação 71

FIGURA 3.28 Aplicação de areia 71

FIGURA 3.29 Nível final da areia na caixa de reação 72

FIGURA 4.1 Esquema de referencia para ensaios da série A 73

FIGURA 4.2 Ensaio de referência – disposição das células de carga na caixa de reação 76

FIGURA 4.3 Gráfico com dados colhidos do ensaio de referência 78

FIGURA 4.4 Gráfico adimensional do ensaio de referência..... 79

FIGURA 4.5 Ensaio 01 – disposição das células de carga na caixa de ração 81

FIGURA 4.6 Ensaio 01 – Registros com a presença da trincheira de indução, $h/B = 1$, $b/B = 1$ e $H=0$ 81

FIGURA 4.7 Ensaio 01 – Adimensionalização dos dados em função de ($H/B \times \sigma_v/\gamma.H$) 83

FIGURA 4.8 Gráfico da relação entre as tensões registradas no ensaio 01 e as tensões teóricas 85

FIGURA 4.9 Registros do ensaio com trincheira $0,75 \times 0,75 \times H=0$ 86

FIGURA 4.10 Adimensionalização dos dados em função de ($H/B \times \sigma_v/\gamma.H$) . 87

FIGURA 4.11 Gráficos da relação entre as tensões registradas no ensaio 02 e as tensões teóricas 89

FIGURA 4.12 Ensaio 03 – Registros do ensaio com trincheira $0,5x0,5 \times H=0$ 90

FIGURA 4.13 Ensaio 03 – Adimensionalização dos dados em função de ($H/B \times \sigma_v/\gamma.H$) 91

FIGURA 4.14 Gráfico da relação entre as tensões registradas no ensaio 03 e as tensões teóricas 93
FIGURA 4.15 Ensaio 04 – Registros do ensaio com trincheira *0,3x0,3 x H=0* 94
FIGURA 4.16 Ensaio 04 – Adimensionalização dos dados em função de (H/B x $\sigma_v/\gamma.H$) 95
FIGURA 4.17 Gráfico da relação entre as tensões registradas no ensaio 04 e as tensões teóricas 97
FIGURA 4.18 Ensaio 05 – Série B - disposição das células de carga na caixa de reação 98
FIGURA 4.19 Ensaio 05 – Tensões registradas com T.I.; *b/B = 1; h/B = 1; H/B = 1* 99
FIGURA 4.20 Tensões relativas adimensionalizadas em função do ensaio 01 100
FIGURA 4.21 Gráfico da relação entre tensões registradas no ensaio 05 e as tensões teóricas calculadas 103
FIGURA 4.22 Ensaio 06 – Registros do ensaio com trincheira induzida *0,75x0,75; H/B=1* 104
FIGURA 4.23 Ensaio 06 – Adimensionalização dos dados do ensaio 06 105
FIGURA 4.24 Ensaio 06 – Tensões teóricas x tensões registradas 107
FIGURA 4.25 Registros do ensaio com trincheira *0,5 x 0,5 x H=1* 108
FIGURA 4.26 Ensaio 07 – *Adimensionalização dos dados em função de* (H/B x σ_v/γ.H) 109
FIGURA 4.27 Ensaion 07 – Tensões teóricas x tensões registradas 111
FIGURA 4.28 Ensaio 08 – Registros do ensaio com trincheira flexível *0,3 x 0,3 x H=0,1* 112
FIGURA 4.29 Ensaio 08 – Adimensionalização dos dados em função de (H/B x $\sigma_v/\gamma.H$) 113
FIGURA 4.30 Ensaio 08 – Avaliação das tensões teóricas x tensões registradas 115
FIGURA 4.31 Tendência das tensões atuantes no plano vertical sobre o alçapão *H/B = 0* 117

FIGURA 4.32 Tendência das tensões atuantes no plano do fundo da caixa *H/B = 0* 119
FIGURA 4.33 Série A – Resultados dos ensaios x resultados teóricos 120
FIGURA 4.34 Ensaios 5 a 8 – Tendência das tensões 123
FIGURA 4.35 Série B – Analise conjunta dos dados teóricos x registros dos ensaios 124

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 Valores para o fator de retenção (CARVALHO, 1992) 18

TABELA 2.2 Comparação de formulações teóricas de coeficientes de reação do solo (módulo do solo de apoio) (ABDEL-SAYED & OKEAGU, 1984) 20

TABELA 2.3 Classificação dos tubos segundo sua capacidade de deformarção 20

TABELA 2.4 Faixa de valores de $\mu'=k_r.tg\phi$ 33

TABELA 2.5 Valores para razão de recalque 43

TABELA 2.6 Resumo dos casos históricos e resultados seus resultados 46

TABELA 2.7 Características e eficiências obtidas (SLADEN & OSWELL, 1988) 48

TABELA 3.1 Correlação das medidas de deslocamento vertical do alçapão com o número de divisões do dial 53

TABELA 3.2 Ligação das células de carga e correspondência de cores entre cabos das células e extensão 56

TABELA 3.3 Ligação das células de carga e correspondência de cores entre os cabos da célula e extensão 60

TABELA 3.4 Resistores de calibração fornecidos para cada canal – Sistema 5110 60

TABELA 4.1 Dimensões e posicionamento da camada flexível 60

TABELA 4.2 Tensões relativas para posição da camada flexível *H/B=0* ... 102

TABELA 4.3 Comparação dos dados do ensaio 06 em relação aos dados do ensaio 05 106

TABELA 4.4 Comparação dos dados do ensaio 07 em relação aos dados do ensaio 05 110

TABELA 4.5 Comparação dos dados do ensaio 08 em relação aos dados do ensaio 05 114
TABELA 4.6 Resumo das tensões dos ensaios da série A relativas ao ensaio de referência 116
TABELA 4.7 Analise conjunta dos ensaios 05 a 08 incluindo o ensaio de referência 122
TABELA 4.8 Resumo das tensões relativas dos ensaios de 05 a 08 122

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society of Testing and Materials
C-PRFV	Tubo de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro, produzido pelo processo de Centrifugação.
cte	Constante
Dr	Densidade relativa
HDB	Projeto Hidrostático Básico.
lim	Limite
PRFV	Plástico Reforçado com Fibra de Vidro.
PVC	Cloreto de Polivinil.
R-PVC	Cloreto de Polivinil reforçado com fibra de vidro.
T.I.	Trincheira Induzida ou Camada Flexível.
#	Espessura de chapas, pol.
b	Largura, m.
b	Largura da camada flexível, m.
B	Largura, m.
B	Largura do alçapão, m.
B_c	Largura horizontal externa do conduto, m.
B_d	Largura da trincheira, m.
c	Coesão, Pa.
C_d	Coeficiente de carga para condutos instalados em valas.
C_d	Coeficiente de ajuste em função do diâmetro – ABDEL-SAYED & OKEAGU.
C_r	Compactação relativa dos grãos.
C_u	Coeficiente de não uniformidade.
C_v	Coeficiente de vala.

C_θ	Coeficiente de ajuste em função de θ – ABDEL-SAYED & OKEAGU.
d	Diferencial.
d_c	Diâmetro vertical do conduto ovalizado, m.
D	Diâmetro médio do tubo ou conduto, m.
D_e	Diâmetro efetivo, mm.
Dn	Diâmetro nominal, m.
D_{10}	Diâmetro efetivo, mm.
e	Algarismo neperiano.
E	Módulo elástico do material do conduto, N/m^2.
E'	Módulo elástico de flexão do material do conduto, N/m^2.
E_n	Módulo reativo do solo nativo, N/m^2.
E_s	Módulo reativo do solo da envoltória do conduto, N/m^2.
E_S^*	Módulo reativo do solo no estado plano, N/m^2.
$E_{s\text{-}50anos}$	Módulo reativo do solo da envoltória do conduto, ao final de 50 anos, N/m^2.
$E_{s\text{-}inicial}$	Módulo reativo do solo da envoltória do conduto, inicial, N/m^2.
E_t	Módulo de elasticidade do tubo, N/m^2.
F	Força, N.
F_r	Fator de retenção.
F_s	Fator de segurança.
h	Altura da camada flexível, m.
h'	Projeção do topo do tubo acima da superfície do terreno natural, m.
H	Posição ou altura de instalação da camada flexível em relação ao fundo da caixa de reação, m.
H	Altura total do recobrimento do solo, m.
H_e	Distância vertical do topo do tubo até o nível do plano de igual recalque, m.
I	Momento de inércia unitário da parede do conduto ($t^3/12$), m^4/m.
k	Módulo de resistência passiva ou coeficiente de subclasse de reação do solo, N/m^2.
K	Coeficiente para determinação da espessura dos tubos de Ferro Fundido.

K_N	Coeficiente de reação normal do solo em relação a superfície do conduto, N/m^2.
K_r	Coeficiente de empuxo ativo do solo ou coeficiente de RANKINI.
K_s	Módulo Elástico final do Solo, N/m^2.
K_{50anos}	Módulo de resistência passiva ou coeficiente de subclasse de reação do solo para 50 anos, N/m^2.
$K_{inicial}$	Módulo de resistência passiva ou coeficiente de subclasse de reação final do solo, N/m^2.
L	Comprimento unitário de um tubo, m.
Pn	Pressão nominal, Pa.
P_s	Sobrecarga pneumática, Pa.
P_B	Pressão média que atua sobre o alçapão, Pa.
q	Sobrecarga, Pa.
r	Raio externo do conduto ou do tubo, m.
R	Raio de curvatura, m.
R_c	Rigidez do conduto, N/m^2.
r_p	Razão de projeção.
R_R	Rigidez relativa, N/m^2.
r_{sd}	Razão de recalque.
S_f	Recalque descendente da geratriz inferior do tubo, m.
S_g	Recalque descendente da superfície do terreno natural, m.
S_m	Recalque extra do plano crítico adjacente ao conduto, m.
t	Espessura, m.
t_l	Espessura do liner, m.
t_t	Espessura total, m.
W_c	Carga vertical de solo uniformemente distribuída sobre o conduto, por unidade de comprimento do conduto, N/m.
X	Parâmetro de atrito da trincheira.
X	Distância horizontal ou afastamento, m.
z	Distância do elemento infinitesimal à superfície do solo, m.
Z	Profundidade qualquer do recobrimento, m.

Z	Altura de recobrimento da camada flexível ou distância entre o topo da camada flexível e o nível da superfície do solo, m.
Za	Altura de recobrimento da célula de carga 1^A ou distância entre o topo da célula 1^A e o nível da superfície do solo.
Zb	Altura de recobrimento da célula de carga 1B ou distância entre o topo da célula 1B e o nível da superfície do solo.
α	Ângulo formado pela largura de apoio da fundação com o eixo vertical do tubo, graus (°)
β	Coeficiente que relaciona o coeficiente de reação do solo com pontos correspondentes em torno do tubo.
δ	Deformação do prisma central de solo devido a presença da camada flexível, m
δ	Deslocamento do alçapão, m.
ΔH	Variação da altura de recobrimento, m.
ΔV	Variação vertical do diâmetro do conduto, m.
ΔV_o	Variação vertical do diâmetro ao final da primeira fase de instalação, m.
ΔX	Variação horizontal do diâmetro do conduto, m.
Δy	Deformação vertical, m.
ΔD	Deformação vertical do diâmetro do tubo, m.
ϕ	Ângulo de atrito interno do solo, graus (°).
θ	Ângulo de deslocamento normal do solo, graus (°).
γ	Peso específico, N/m^3 ou g/cm^3.
γ_B	Coeficiente de leito da equação original de SPANGLER.
γ_s	Peso específico do solo, Pa.
μ'	Coeficiente de atrito (tg ϕ).
ν_s	Coeficiente de Poisson do solo.
ρ_d	Massa específica seca da areia, kg/l.
$\rho_{d\text{-}max}$	Massa específica seca máxima da areia, kg/l.
ρ_d	Massa específica seca mínima da areia, kg/l.

σ	Tensão total, Pa.
σ_h	Tensão horizontal do solo, Pa.
σ_v	Tensão vertical do solo, Pa.
σ_{vC}	Tensão vertical registrada no ensaio com a presença da camada flexível, Pa.
σ_{vh}	Tensão vertical total do solo no plano do fundo do silo, Pa..
σ_{vR}	Tensão vertical registrada no ensaio de referência, Pa.
μ'	Coeficiente de atrito entre o solo de reaterro e as paredes laterais da trincheira, Pa.
ξ	Coeficiente de conversão dos valores de ovalizações horizontais em verticais.

RESUMO

MELOTTI, O.K. (2002). *Tubulações enterradas: O uso da trincheira induzida.* São Carlos, 2002. 137p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

Atualmente a otimização e a redução de custos verificados na fabricação de tubulações está caminhando para um limite. Toda e qualquer modificação no processo produtivo exige grandes investimentos com retorno a prazos cada vez maiores. Assim, a possibilidade de poder contar com técnicas que permitam a redução de esforços sobre tubulações enterradas traz sem dúvida uma importante contribuição. Este trabalho estuda o uso da trincheira induzida como forma de reduzir os esforços que atuam sobre condutos enterrados, utilizando duas séries de ensaios denominadas "A" e "B". Cada série é composta basicamente de quatro combinações diferentes, com variações geométricas da relação de altura relativa (h/B) e largura relativa (b/B). A serie B teve a posição relativa (H/B) da camada flexível modificada em relação à série A. Os ensaios realizados no Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos apresentam como resultado uma redução dos esforços da ordem de 44% a 86% em relação ao ensaio de referência, montado sem o uso da camada indutora.

Palavras chaves: (1) Condutos. (2) Trincheira induzida. (3) Falsa trincheira. (4) Redução de esforços. (5) Tubulações. (6) Instalação. (7) Aterro.

ABSTRACT

MELOTTI, O.K. (2002). *Buried pipes: The use of induced trench.* São Carlos, 2002. 139p. Dissertation (Master) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

Nowadays the optimization and the reduction of costs verified in the pipes production are walking for a limit. All and whatever modification on the productive process demands great investments with larger time return. Thus, the possibility of taking account with techniques that allows reduction efforts on buried pipes bring without any doubt, an important contribution. This work studies the induced trench to reduce the efforts that act over buried conduits, using two series, "A" and "B", with four treatments each one. The A series is composed with four different combinations. These combinations have geometric variation between relative height *(h/B)* and relative width *(b/B)* of flexible layers, were built directly over the trap door. The "B" series is composed with the same geometric flexible layer used in series "A", and they have their relative position *(H/B)* modified. The treatments were conducted at the "Departamento de Geotecnia" da "Escola de Engenharia de São Carlos". The results obtained were a reduction of the 44 to 86% on the efforts in relation to the reference treatment built without the use of an induced layer.

Key words: (1) Conduits. (2) induced trench. (3) false trench. (4) reduction of efforts. (5) Pipes. (6) installation. (7) embankment.

Capítulo 01

INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

O homem moderno vive dentro de um espaço, cada vez mais confinado, devido à explosão demográfica e a tendência de verticalização das cidades. A urbanização e o crescimento das cidades geram a necessidade do uso de tubulações no transporte e abastecimento de água, na drenagem urbana, na coleta de esgoto e outros efluentes.

"A água é essencial ao consumo e à higiene humana, à fabricação de muitos bens industriais, à produção de alimentos e industrias têxtil" (LINSLEY & FRANZINI, 1978, p XI).

Embora seja um recurso valioso, a água é um bem cada vez mais raro. O ponto de captação, produção ou de tratamento e armazenagem esta cada vez mais distante do seu local de utilização ou consumo.

Os efluentes industriais e esgotos domésticos, têm todo o sistema de coleta localizado em extensas áreas cada vez mais distante do ponto de tratamento e descarte.

A impermeabilização dos solos nas cidades não deixa que a água das chuvas se infiltre, gerando o escoamento de grandes volumes de águas superficiais e a necessidade de instalações de condutos capazes de drenar eficientemente toda essa água.

Seja no campo ou nas cidades, as necessidades básicas de abastecimento, rural, industrial e urbano, além de drenagem, esgotamento sanitário, efluente

industrial, irrigação, e outros, são atendidas através de tubulações quase sempre enterradas.

O fato de se aplicar tubulações enterradas, traz a vantagem de não poluir o espaço visual nem tampouco concorrer com o espaço essencial a outros serviços.

A opção pelas redes de serviços enterradas se faz com base na funcionalidade da maioria dos casos, na segurança, na praticidade e na facilidade de instalação.

Hoje pode ser encontrada uma grande variedade de tipos de tubos e condutos, à disposição do mercado, alterando não só o material empregado na sua fabricação, como também o processo de produção, sua forma geométrica, tipos de união e rigidez da seção transversal.

Embora os diversos tipos de tubos e condutos ofereçam uma solução técnica e econômica para os problemas apresentados, há a necessidade de se trabalhar com técnicas adequadas de projeto e instalação para cada material selecionado. Sob o ponto de vista prático, o que se tem observado, é uma falta de entrosamento entre a atividade da maioria dos engenheiros que trabalham em companhias de saneamento, usinas e outros órgãos públicos, que acabam assumindo funções meramente administrativas sem tempo e sem intimidade com cálculos, com as condições de projeto e as condições de instalação. Os empreiteiros por sua vez, geralmente, não tratam a instalação de uma tubulação como uma obra de engenharia, relevando especificações de projeto, o controle de instalação e a boa técnica de engenharia, a um segundo plano.

"O êxito de uma obra não depende apenas, da elaboração de um bom projeto, mas e principalmente da boa observância deste na fase de construção. Além disto os detalhes construtivos e especificações deverão ser no mínimo suficientes para garantir uma execução compatível com as hipóteses do projeto. Entretanto, as exigências deverão ser suficientemente flexíveis para não inibir criteriosas alterações, pela fiscalização" (ZAIDLER, 1983, p.15).

Tanto o projeto como a instalação de uma tubulação, devem merecer os mesmos tratamentos, adotar os mesmos critérios. Desse modo, podem ser evitados onerosos custos de operação e manutenção.

No projeto e instalação das tubulações devem ser levadas em conta as ações de cargas internas e externas a que estarão submetidas quando em serviço. As cargas atuantes se caracterizam por serem de natureza permanente ou Acidental.

As cargas de natureza permanente são:

- A carga de pressão interna,
- O peso do solo,

No Brasil as cargas de natureza acidental mais comuns são:

- As cargas de roda,
- As variações do nível do lençol freático ao longo do ano,
- O transitório hidráulico,
- Outras condições de sobrecargas.

Embora existam métodos de cálculos que permitem quantificar as cargas atuantes sobre as tubulações enterradas e suas conseqüentes deformações, há diversos aspectos de projeto que merecem estudos adicionais.
Pode-se destacar o emprego de técnicas que permitam reduzir os esforços, atuantes em tubos enterrados, provenientes do peso do solo envolvente e de cargas diversas.

Tais técnicas de instalação devem oferecer boas condições de apoio à estrutura, reduzir as deformações circunferências, aumentar a vida útil das tubulações e ainda minimizar os custo operacionais com a redução de perdas e fugas e dos custos com manutenção.

Dentre os processos de redução de esforços sobre tubulações enterradas, o que mais desperta interesse é o método da trincheira induzida, pois além de promover um alívio das tensões que agem diretamente sobre a coroa do tubo, dissipa estas tensões para o solo de envolvimento lateral. Este método ainda pode oferecer vantagens quando comparado a outros, tais como baixo custo de investimento, o emprego de materiais facilmente encontrado e simplicidade de execução.

O desenvolvimento destas técnicas permite criar e oferecer uma padronização mais criteriosa de instalação e construção de trincheiras, de forma simples e prática,

porém segura e eficiente, acompanhada de técnicas de controle, aplicadas com intuito de aproximar a linguagem científica daquela empregada pelos técnicos nos canteiros de obra, permitindo aos instaladores e usuários aplicar estes fundamentos e tirar proveito dos seus benefícios.

1.2 Enfoque do problema

"Assim como outras estruturas enterradas, o projeto de tubulações envolve primeiramente a estimativa das cargas e tensões máximas a que os tubos estarão submetidos quando em serviço e em segundo lugar, garantir que o tubo selecionado resista a estas tensões e deformações com segurança sem estar superdimensionado ou tenha um custo de instalação antieconômico" (YOUNG & TROTT, 1984, p.23).

Ao fazer o dimensionamento de tubulações enterradas, deve-se considerar, não só as propriedades do solo, que atua junto ao tubo impedindo sua ovalização e aumentando sua resistência às cargas externas, mas também as propriedades intrínsecas dos mesmos.

Segundo VIANA & BUENO (1998, p.1) O comportamento mecânico de tubulações enterradas é altamente dependente do histórico das deformações sofridas pelo elemento estrutural durante a fase construtiva e dos deslocamentos relativos que ocorrem entre a estrutura e o solo circundante, ao longo da obra e da vida útil.

A instalação de uma tubulação enterrada, em um maciço de solo uniforme, irá causar uma perturbação modificando todo o estado de tensão e deformação do solo, interferindo no comportamento, nas ovalizações e na redistribuição das "tensões de campo livre". Deste modo a ação das cargas externas sobre uma tubulação enterrada também passa a ser influenciado pelo comportamento do solo.

"Quando um solo é submetido a solicitações externas, por meio de carregamentos [construção de uma autopista] ou descarregamentos [escavações], as tensões no seu interior se alteram. Havendo alterações de tensões efetivas, o solo se deforma, em conseqüência de diversos fatores, entre eles o rearranjo entre as partículas do solo" (HACHICH, W et AL, 1999, p.77).

A diferença entre o deslocamento vertical sofrido pelo tubo e a deformação do maciço terroso é denominada recalque diferencial e gera movimentos relativos promovendo uma forte interação, seguido de transferências de tensões entre o solo e o tubo e vice-versa. A proporção das cargas de solo atuantes que atingem a estrutura é uma função complexa, que depende de diversos fatores, entre eles podem ser citados:

- Características do próprio solo,
- Geometria da estrutura,
- Rigidez da estrutura,
- Cargas de superfície, que por sua vez pode ser estática, dinâmica e a combinação entre ambas.

A distribuição das cargas de solo, em muitos casos pode resultar numa concentração de tensões sobre a estrutura, no caso desta ser mais rígida que o solo, ou na atenuação das tensões, no caso em que a estrutura é menos rígida que o solo.

Deste modo a distribuição de tensões pode assumir valores muito diferentes das tensões que estariam atuando no interior do maciço terroso, caso o tubo não estivesse ali.

KRIZEK[1] ET AL apud VIANA & BUENO (1998) sugerem que a magnitude do carregamento pode também variar bastante ao longo da vida útil do conduto, especialmente da época da sua construção para o período de entrada em serviço.

Como pode ser observado o conhecimento e o domínio das técnicas de instalação torna-se cada vez mais importante e gira em torno de um problema central de suma importância:

> *Como controlar os movimentos relativos entre solo e tubo de uma forma segura, de modo a garantir a integridade da instalação e quem sabe poder tornar a obra mais econômica ou em alguns casos torna-se uma alternativa técnica?*

O método da trincheira induzida foi desenvolvido na Universidade Estadual de IOWA, em 1922 por MARSTON para aplicação específica em tubos rígidos instalados em aterros, com a finalidade de controlar estes movimentos relativos e de reduzir as tensões sobre a estrutura, fornecendo a estes as mesmas vantagens de tubos instalados em trincheiras. Rapidamente os testes mostraram que esta técnica é bastante eficiente e que a carga devido ao peso do solo é reduzida drasticamente

---

[1] KRIZEK, R.J.; PARMELEE, R.A.; KAY, J.N.; ELNAGAAR, H.H. (1971). *Structural analysis and design of pipe culvert*. Washington, apud VIANA, P.M.; BUENO, B.S. (1998) *Redução de Esforços sobre a estrutura*. São Carlos, USP. p.16.

quando comparados com as cargas originais (SPANGLER[2] apud SLADEN & OSWELL, 1987, p.541).

Embora a literatura técnica documente diversos casos de aplicação com o uso desta técnica nos Estados Unidos e Canadá, seu uso no Brasil é muito pouco difundido, com apenas alguns trabalhos publicados, merecendo por isto atenção.

[2] SPANGLER,M.G. (1968). *Discussion of the modification of the pressures on rigid culverts with fill procedures*. Highway Research Record, № 249; 41-43, apud SLANDEN, J.A.; OSWELL, J.M. (1988) *The induced trench method – a critical review and case history*. Can.Geotech. j., v.25, p.541-62.

1.3 Propósito do trabalho

O propósito deste trabalho é o de contribuir para a melhoria do emprego da técnica da trincheira induzida na redução de esforços sobre tubulações enterradas e o comportamento das tensões atuantes sobre o tubo e sobre o solo adjacente, em função da variação das dimensões e posição ocupada pela camada de indução em relação à coroa do tubo.

Além da questão central apresentada, existem outras questões coadjuvantes a serem feitas, e que poderão auxiliar na elaboração de projetos de aplicação da trincheira flexíveis:

- Até que ponto é possível reduzir o valor das tensões que agem sobre o conduto?
- A que nível pode-se reduzir com segurança as tensões que agem sobre a tubulação?
- Em que se basear para decidir o quanto se deve reduzir as tensões?

Para investigar o emprego da técnica da trincheira induzida nestas condições, foram produzidos nove ensaios divididos em duas séries de 4 ensaios e mais um ensaio de referência.

Na execução dos ensaios, foi empregada uma caixa de reação instrumentada, utilizando areia compactada, onde então foram implantadas as camadas flexíveis com geometrias distintas a serem estudadas.

O trabalho de pesquisa conduzido concentrou-se na analise comparativa do comportamento de cada uma das configurações ensaiadas em relação ao ensaio de referência e também na analise dos ensaios que compõem cada serie estudando a evolução das tensões com a alteração da geometria das camadas flexíveis.

A realização destes testes somente foi possível graças à iniciativa do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (SGS-EESC-USP) que montou um laboratório dedicado a estudar e executar testes envolvendo a instalação de tubulações entre outras finalidades.

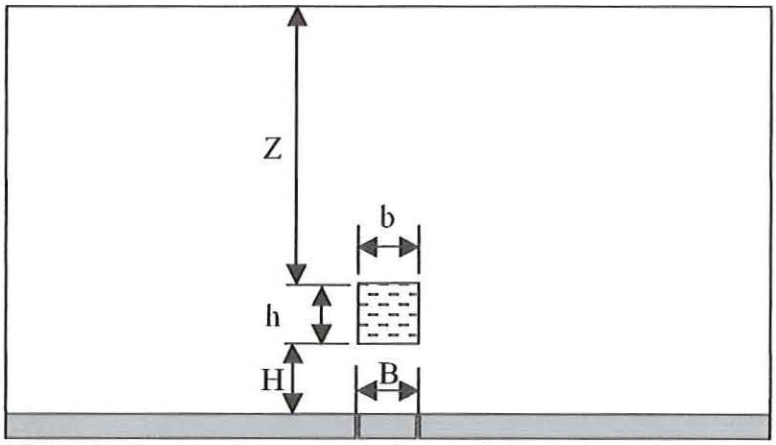


Fig.1.1 – Esquema de montagem da camada flexível na caixa de reação.

O esquema apresentado na figura 1.1 ilustra a concepção genérica da montagem das camadas de indução na caixa de reação. As letras maiúsculas representam as dimensões ou posições pertinentes à caixa de reação enquanto as letras minúsculas se referem à camada flexível.

Assim, as dimensões são indicadas da seguinte forma:

- B largura do alçapão.
- H Posição de instalação da camada flexível em relação ao fundo da caixa de reação.
- Z Altura de recobrimento da camada flexível.
- b largura própria da camada flexível.
- h altura própria da camada flexível.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Este capítulo é dedicado a fazer uma síntese do desenvolvimento das teorias necessárias a uma boa compreensão dos fenômenos desenvolvidos na interação solo-estrutura e que permitirão a posterior analise dos dados relativos aos ensaios realizados.

2.2 Revisão bibliográfica

No final do século XIX, os donos de silos observam os efeitos do arqueamento de grãos no fundo dos silos, durante a descarga. "Ao abrir o alçapão de um silo de grãos, acontece freqüentemente, que as sementes de cereais inicialmente fluem naturalmente, porém momentos depois interrompem a operação de descarregamento, formando um arco sobre o alçapão gerando tensões dinâmicas na estrutura do fundo dos silos" (KELLOGG, 1993, p.487).

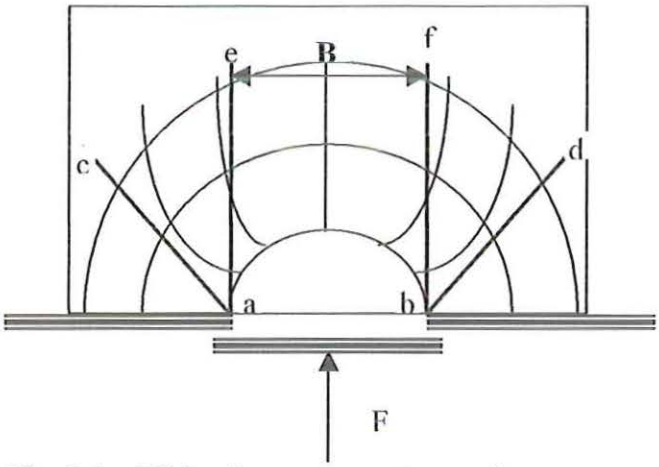


Fig. 2.1 – Efeito do arqueamento no silo

Sensibilizado pelo problema JANSSEN (1895), apresentou um trabalho sobre cargas laterais de materiais granulares em estruturas de

silos. As equações propostas por ele serviram como base teórica para que futuros pesquisadores pudessem compreender e aplica-las no estudo do comportamento de cargas verticais em solos granulares.

Observa-se que são formados arcos de grãos, escorados entre as superfícies de ruptura *ac* e *bd* os quais são capazes de sustentar o peso do material sobrejacente.

Se a força *F* (figura 2.1), necessária para manter a tampa do alçapão fechada, for medida antes de qualquer movimento, essa força será igual ao peso estático de grãos sobre ela.

Entretanto ao se mover para baixo, no sentido de abrir o alçapão, o valor de *F* deverá decrescer, na medida que o escoamento dos grãos formarem as superfícies de ruptura sobre as quais se desenvolvem os arcos de grãos no silo, até que o escoamento se interrompa (VARGAS, 1978, p.416).

MARSTON E ANDERSON[1] apud BULSON (1985), trabalham com problemas de falhas de instalações de tubos rígidos no Iowa States University, Ames, USA. Em 1913 modificaram a teoria desenvolvida por JANSSEN, propondo um modelo matemático que descreve a ação de cargas verticais de solos sobre estruturas instaladas em valas. Nesse trabalho, foi discutida a ação de cargas atuantes sobre tubos rígidos, em termos de forças cisalhantes, desenvolvidas em um prisma de solo, sobre a estrutura. "O trabalho de JANSSEN forneceu a necessária compreensão teórica para essas observações e o desenvolvimento da teoria de cargas verticais de solo" (KELLOGG, 1993, p.487).

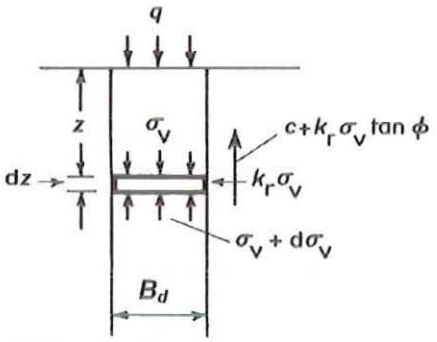


Fig. 2.2 – Análise típica proposta por JANSEN (BULSON, 1985).

Aplicando-se a analise de arqueamento em silos, equação (2.1) e igualando-se a largura do alçapão *B* (figura 2.2) à largura da trincheira B_d, de modo que, ao desprezar o efeito da coesão, obteve a equação 2.3.

[1] Marston, A. & Anderson, A.O. (1913) *Iowa Engineering Experiment Station*, Bull № 31 apud Bulson, P. S. (1985). *Buried Structures, Static and Strength*, New York, Chapman and Hall, p.52.

$$\sigma_v = \frac{B_d \cdot \gamma}{2.k_r tg\phi} \cdot \left[1 - e^{\left(-k_r.tg\phi.\frac{2.Z}{B_d}\right)} \right] + q.e^{\left(-k_r.tg\phi.\frac{2.Z}{B_d}\right)} \tag{2.1}$$

fazendo:

$$x = k_r.tg\phi.\frac{2.Z}{B_d} \tag{2.2}$$

$$C_d = \frac{1 - e^{(-x)}}{2.k_r.tg\phi}$$

$$\sigma_v = C_d.B_d\gamma + q.e^{-x} \tag{2.3}$$

Onde:

- B_d = Largura da trincheira.
- c = Coesão.
- C_d = Coeficiente de carga para o conduto.
- γ = densidade do solo.
- k_r = Coeficiente de Rankini.
- Z = Altura do recobrimento de solo.
- q = Carga externa.
- σ_v = Tensão vertical.
- dz = Elemento diferencial de solo.
- $d\sigma_v$ = Incremento de tensão no elemento diferencial de solo.
- ϕ = Ângulo de atrito interno do solo.
- x = Parâmetro de atrito da trincheira.

MARSTON[2] apud BULSON (1985) acreditava que a coesão poderia ser desprezada, porque demandaria um tempo considerável após a instalação de uma

[2] Marston, A. & Anderson, A.O. (1913). *Iowa Engineering Experiment Station*, Bull № 31 apud Bulson, P. S. (1985). *Buried Structures, Static and Strength*, New York, Chapman and Hall, p.53.

tubulação, antes que a coesão efetiva se desenvolva entre o solo de recobrimento e o solo nativo adjacente, além disso, uma chuva ou alguma outra ação, poderia eliminar qualquer coesão aparente criada.

Ao desprezar o efeito da coesão, permanece somente a condição pura de atrito, desenvolvendo planos de cisalhamento ao longo das paredes laterais da vala.

Nota: Provavelmente MARSTON desenvolveu este raciocínio com base em sua experiência com solos de climas temperados e também pensando na segurança da obra. Não obstante sabe-se que a coesão não depende somente do teor de umidade do solo e do efeito capilar, mas também da sua constituição mineralógica. A coesão verdadeira, oriunda da presença das pozolanas e/ou de íons nos solos, pode se desenvolver instantaneamente. Entretanto estas características dependem de serem confirmadas através ensaios laboratoriais.

O valor do coeficiente de empuxo ativo do solo k_r foi calculado através da equação (2.4) desenvolvida por RANKINI[3] apud BULSON (1985).

$$k_r = \frac{1 - \operatorname{sen}\phi}{1 + \operatorname{sen}\phi} \tag{2.4}$$

$$ou$$

$$k_r = \tan^2\left(45^o - \phi/2\right)$$

"As pesquisas posteriores confirmam o acerto da teoria proposta por MARSTON", (VIANA & BUENO, 1998, p.20).

"Em 1936 TERZAGHI apresentou durante o Primeiro Congresso Internacional de Mecânica dos Solos, um trabalho sobre a distribuição de tensões e o arqueamento do solo, utilizando, um silo dotado de um alçapão" (VARGAS, 1978, p.416). Foi detectado que a ação da pressão do solo ao longo de um prisma vertical situado sobre o alçapão, independe do estado de tensões do solo localizado a mais de duas ou três vezes a largura B acima do alçapão.

O resultado do experimento realizado por TERZAGHI pode ser visto na figura 2.3 (BULSON, 1985, p.7).

---

[3] Rankine, W.J.M. (1862), *Manual of Civil Engineering*. Inglaterra, apud Bulson, P. S. (1985). *Buried Structures, Static and Dynamic Strength*, New York, Chapman and Hall, p.53.

- B = largura do alçapão.
- Z = profundidade qualquer do recobrimento.
- $Z = H$, se não houver nenhum arqueamento.
- σ_v= tensão vertical do solo.
- σ_{vh}= tensão vertical atuante no plano do fundo do silo.

Pode ser observado que para a relação entre a profundidade e a largura do alçapão $Z/B > 2{,}5$ não há alívio da tensão vertical devido o arqueamento, mas quando $Z = H$, a tensão vertical atuante, imediatamente acima do alçapão, passa a ser aproximadamente 10% de σ_{vh}.

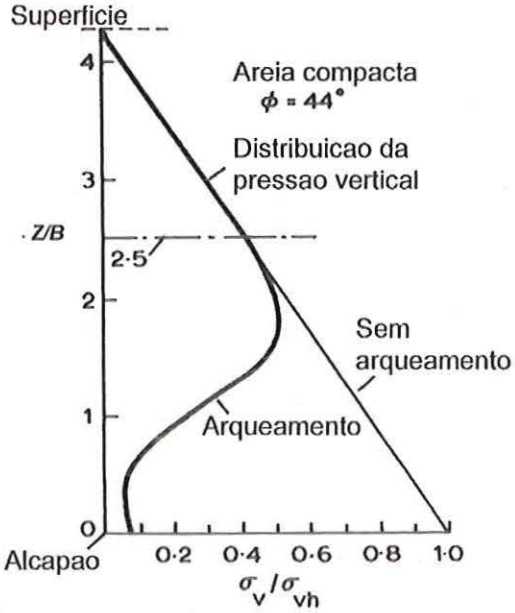


Fig. 2.3 – Experimento de TERZAGHI em silo com alçapão móvel.

A curva experimental pode ser comparada a curva calculada teoricamente, pela aplicação da equação (2.1), se for assumido que a superfície de cisalhamento se desenvolve quando a porta inferior se abrir verticalmente para baixo. Neste caso o exponencial *negativo* para x implica no *arqueamento ativo*, decorrente da abertura do alçapão para baixo ou de maneira similar ao de um movimento equivalente de deslocamento para baixo da geratriz superior de um tubo flexível enterrado. Nesta dissertação, apresenta-se uma analise comparativa entre os valores teóricos obtidos pela aplicação da equação (2.1) e os valores registrados nas duas séries de ensaios realizados.

Se o movimento do alçapão for no sentido ascendente, há uma tendência de comprimir o solo de recobrimento, gerando um *arqueamento passivo*. Do mesmo modo pode ser feita uma relação com um tubo de estrutura mais rígida que o solo envolvente, que gera igualmente um *arqueamento passivo*. Neste caso há uma troca de sinal do índice x, que passa a ser *positivo* (BULSON, 1985, p.9).

A experiência realizada por MCNULTY[4] apud BULSON (1985) em 1964, ajudou a compreender melhor os conceitos de *arqueamento passivo* e *ativo* investigando os efeitos do arqueamento em areias. Usando um alçapão circular, detalhe da figura 2.4, MCNULTY aplicou uma sobrecarga pneumática P_s observou que as curvas de arqueamento são funções das relações entre a *pressão pneumática* aplicada na superfície da caixa de reação P_s, a *pressão média registrada* que age sobre o alçapão, aqui denominada por P_B e o *deslocamento do alçapão* δ pelo *diâmetro do alçapão* B. O arqueamento ativo, ocorre com o movimento do alçapão para baixo, cai rapidamente para valores de H/B menores que 1, tendendo rapidamente a zero enquanto que no arqueamento passivo, estes valores tendem a crescer indefinidamente, provavelmente até a ruptura do solo.

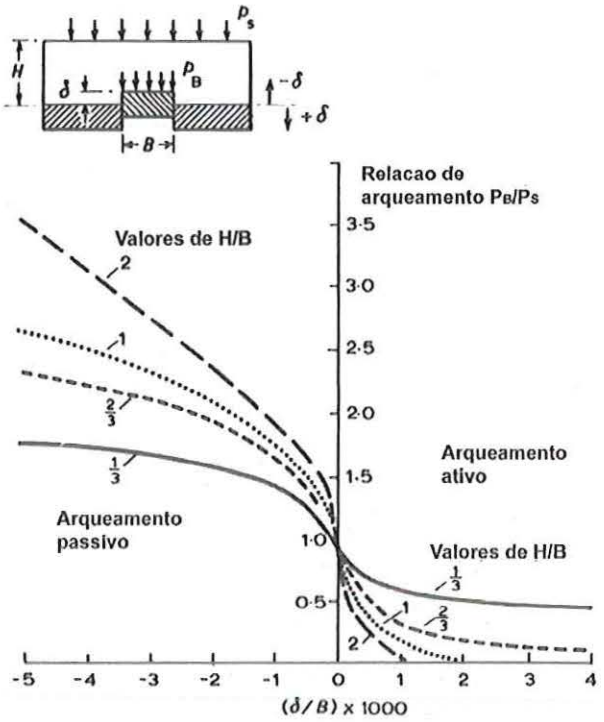


Fig. 2.4 – Arqueamento em areias

As expressões matemáticas que levam em consideração o efeito do solo na deformação de tubulações flexíveis enterradas foram desenvolvidas por SPANGLER a partir da observação dos resultados de duas experiências, em 1927 e 1934, estudando o comportamento de tubos corrugado, de 42 pol de diâmetro, (CARVALHO, A, 1992, p.350).

A carga vertical de solo de cobertura, $W_c/2R$, é suposta ser uniformemente distribuída na metade superior do tubo, cobrindo toda a largura sua B. A reação vertical do solo, na geratriz inferior do tubo, é também suposta ser distribuída de

[4] MCNULTY, J.W. (1965), *An Experimental Study of Arching in Sand,* US Waterways Experimental Station, Tech, Rep. 1-674 apud BULSON, P. S. (1985), *Buried Structures, Static and Dynamic Strength*, New York, Chapman and Hall, p. 9.

maneira uniforme, atuando numa faixa correspondente ao ângulo de 2α, sendo α o ângulo de apoio do tubo sobre a fundação.

Lateralmente atua a pressão passiva do solo de ambos os lados e que se opõe à deformação iniciada pelo tubo, cobrindo uma faixa de 100°.

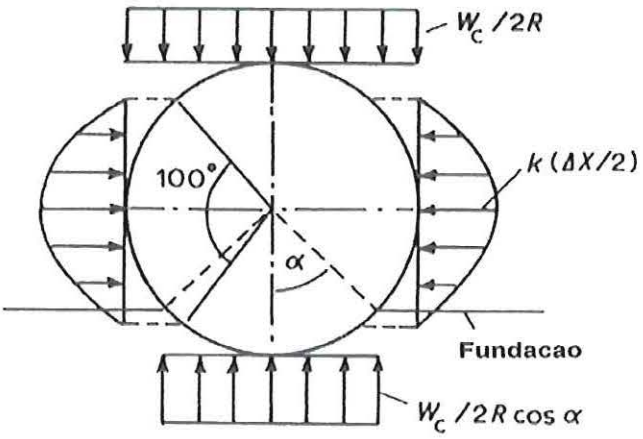


Fig. 2.5 – Distribuição de cargas em tubos flexíveis, segundo SPANGLER.

Segundo BULSON (1985), foram desenvolvidas expressões matemáticas para "momentos, forças e deflexões", de onde SPANGLER deduziu que a ovalização horizontal (ΔX) é dada por:

$$\Delta X = \frac{\gamma_B . W_c . R^3}{E.I + 0{,}061 . k_s . R^4} \qquad (2.5)$$

Sendo o coeficiente de leito γ_B é dado pela equação:

$$\gamma_B = 0{,}5.\text{sen}\,\alpha - 0{,}082.\text{sen}^2\alpha + 0{,}080.\frac{\alpha}{\text{sen}\,\alpha} - 0{,}16.\text{sen}\,\alpha.(\pi - \alpha)... \qquad (2.6)$$
$$- 0{,}04.\frac{\text{sen}(2.\alpha)}{\text{sen}\,\alpha} + 0{,}318.\cos\alpha - 0{,}208$$

Sendo:

- k_s = módulo de resistência passiva, ou "coeficiente de subclasse de reação" do solo, o qual é uma relação não linear com a tensão.
- α = é o valor da metade do ângulo de apoio entre o tubo e o leito, conforme indicado na figura 2.5.
- W_c = carga vertical por unidade de comprimento, aplicada sobre a largura do tubo.

Assim, a expressão usada para cálculos, aplicados a tubos flexíveis pode ser expressa da seguinte forma (CARVALHO, 1992, p356):

$$\frac{\Delta V}{D} = \frac{\gamma_B \cdot \sum W_c}{\frac{E.I}{R^3} + 0{,}061.k_s.C_v} - \frac{\Delta V_0}{D} \qquad (2.7)$$

Onde:

$\frac{\Delta V}{D}$ = Ovalização vertical relativa

$\frac{\Delta V_0}{D}$ = Ovalização vertical relativa inicial (negativa)

Esta parcela, de ovalização é considerada negativa, pois contribui para um aumento do diâmetro vertical da tubulação, na fase de instalação, em função do trabalho de compactação dos prismas laterais. A ovalização inicial citada se opõe, de longo prazo, a ovalização vertical produzida pela ação das cargas de solo.

- ΔV = Ovalização vertical.
- D = Diâmetro.
- γ_B = Constante de leito (γ_B = 0,083 para um ângulo α = 180°).
- k_s = Módulo reativo final do solo da envoltória.

  "... *Seu valor depende do grau de compactação, da profundidade, do teor de umidade e tipo de solo. Para* ***solos finos****, o módulo reativo depende também do tempo e as deflexões em longo prazo devem ser calculadas usando módulo reativo final, projetado para 50 anos, através do fator de retenção", (CARVALHO, 1992, p.363).*

- F_r = Fator de retenção ($F_r = k_{50anos} / k_{inicial}$).

"O fator de retenção, aplicado ao módulo reativo inicial, $k_{inicial}$, exprime o valor da deformação do solo sob a ação de uma carga, com o passar do tempo, k_{50anos}, mais precisamente 50 anos, devido ao fenômeno de consolidação. Os solos finos sob

carga se consolidam e deformam com o passar do tempo, sendo esse fenômeno análogo à fluência viscosa (creep) observada nos metais e plásticos, portanto, o fator de retenção deve ser utilizado para o cálculo de deformações de longo prazo" (CARVALHO, 1992, p.364).

"A estrutura multifásica, característica dos solos finos e/ou orgânicos lhes confere um comportamento próprio, tensão-deformação, o qual normalmente depende do tempo. Um esforço de compressão aplicado ao solo fará com que varie seu volume, o qual poderá ser atribuída a uma compressão da fase sólida, uma compressão da fase fluida (ar-água) ou uma drenagem da fase líquida dos vazios (dissipação das pressões neutras)", (BUENO & VILAR, 1999, p. 77).

Tabela 2.1 - Valores para o fator de retenção (CARVALHO, 1992)

GRUPO DE SOLO	FATOR DE RETENÇÃO
Pedregulho grosso	1,0
Pedregulho fino	0,9
Areia grossa	0,8
Areia fina	0,7
Silte	0,4
Argila	0,4

- $Cv =$ Coeficiente de vala

Na formula original de SPANGLER, equação (2.5), não aparece o coeficiente de vala (CARVALHO, 1992, p.367). Para calculo da deformação é usado o valor do módulo reativo do solo de recobrimento primário, sem fazer referência à largura da vala ou à distância entre o tubo e o solo nativo que forma a parede da vala.

Entretanto, a influência do solo nativo no sistema pode ser significativa. O coeficiente de vala leva em consideração à distância do tubo à parede da vala, formada pelo solo nativo (figura 2.6) e quantifica a influência do módulo do solo nativo "k_n" na determinação da deformação e é expresso da seguinte forma.

$$C_v = \frac{1,662 + 0,639 \cdot \left(\frac{B_d}{B_c} - 1\right)}{\left(\frac{B_d}{B_c} - 1\right) + \left[1,662 - 0,361 \cdot \left(\frac{B_d}{B_c} - 1\right)\right] \cdot \left(\frac{k_s}{k_n}\right)} \qquad (2.8)$$

Nesta expressão, temos:

- k_n = Módulo reativo final do solo nativo ou natural.
- k_s = Módulo reativo final do solo da envoltória.
- B_c = Diâmetro do tubo.
- B_d = Largura da trincheira.

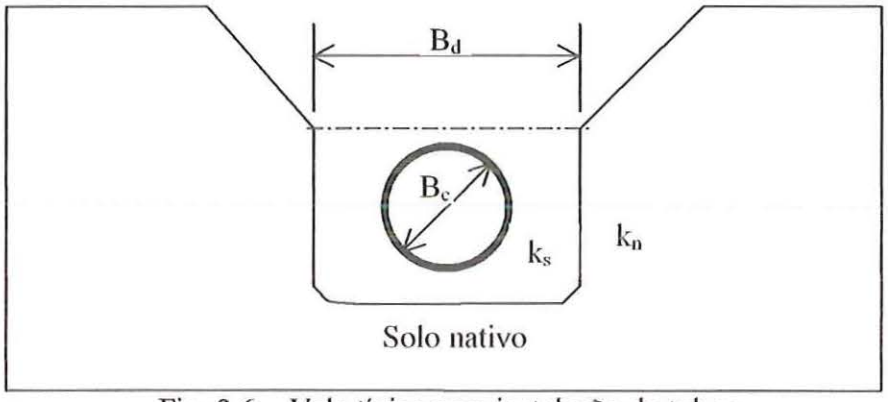


Fig. 2.6 – Vala típica para instalação de tubos determinação do coeficiente de vala

O que pode ser observado é a confirmação da complexidade dos parâmetros que interferem no comportamento do sistema solo-tubo. O trabalho apresentado por ABDEL-SAYED & OKEAGU (1984) traz uma analise do coeficiente de reação normal do solo em relação à superfície do conduto k_N bem como do coeficiente de reação tangencial do solo em relação à superfície do conduto k_T.

Uma comparação das formulações teóricas do coeficiente de reação de solo é mostrada na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Comparação de Formulações Teóricas de Coeficiente de Reação de Solo (Módulo do Solo de Apoio). ABDEL-SAYED & OKEAGU (1984)

Pesquisador	Expressão sugerida para k_N
LUSCHER (1966)	$k_N = \dfrac{k_s.\left[1-\left(\dfrac{R_i}{R_o}\right)^2\right]}{(1+\nu_s).\left\{1+\left[\dfrac{R_i}{R_o}\right]^2.(1-2.\nu_s)\right\}.R}$
MEYERHOF & BAIKE (1963)	$k_N = \dfrac{k_s}{2.(1-\nu_s^2).R}$
KLOPPEL & GLOCK (1970)	$k_N = \dfrac{k_s}{R.(1+\nu_s)}$
ABDEL-SAYED & OKEAGU (1984)	$k_N = \beta.C_d.C_\theta.\sqrt{\dfrac{H}{B_c}};$ $C_d = 4{,}25 - 0{,}075.\,{}^{B_c}\!/_{100}$ $C_\theta = \left(1 + 5{,}40.{}^{\theta}\!/_{\pi}\right)/4$ $\beta = 0{,}45 + \dfrac{B_c}{200}\left(\dfrac{\theta}{\pi} - 0{,}5\right)^2$

Onde:

- k_N Coeficiente normal de reação do solo.
- k_s Módulo do solo .
- R Raio de curvatura.
- ν Relação de Poisson do solo.
- θ Ângulo de deslocamento normal do solo.
- β Coeficiente que relaciona o coeficiente de reação do solo com pontos correspondentes em torno do tubo.

Foi estabelecido por TERZAGHI[5] apud ABDEL-SAYED & OKEAGU (1984), que estes coeficientes não são propriedade única do solo. Eles são dependentes tanto das propriedades de solo como também da forma geométrica do conduto, direção e parâmetros de rigidez da estrutura, da densidade relativa do solo de recobrimento lateral e da profundidade de instalação.

Qualquer modelo realista do problema de interação deve incluir alguma forma de relação não linear de tensão e tração em função do solo usado. Para este fim, o modelo não linear apresentado na tabela 2.2, sugerido por ABDEL-SAYED & OKEAGU (1984) descreve o comportamento mecânico do solo reaterro lateral granular é uma melhoria óbvia do modelo linear elástico de teorias existentes.

A aplicação das equações apresentadas se estende a tubos e condutos circulares e elípticos.

---

[5] TERZAGHI, K. V. (1934). *Stress Distribution in Dry and Saturated Sand Above a Yielding.* In: Vienna, n.Z-3, apud ABDEL-SAYED, G. & OKEAGU, B. (1984). *Coefficients of Soil Reaction for Buried Flexible Conduits.* Journal of Geotechinical Engineering, V. 110, № 07, p. 908 – 922.

2.3 Classificação

A classificação dos tubos é geralmente feita considerando-se as condições de aplicação em que os mesmos devem trabalhar.

2.3.1 Condições hidráulicas

O escoamento de um fluido no interior de um tubo gera tensões nas paredes internas devido às pressões a que este é condicionado. Durante as operações de recalque deve-se fornecer ao fluido, uma quantidade de energia suficiente para vencer um desnível geométrico e ainda as perdas de emergia dissipadas pelo atrito viscoso e pela rugosidade das paredes do conduto. Em coletores de águas pluviais e esgotamentos sanitários, quase que por unanimidade se verificam escoamentos em condutos com superfícies livres. Nos sifões invertidos, onde são vencidos vales entre os pontos de abastecimento, embora o escoamento ocorra sem a necessidade de recalque, com o aproveitamento do desnível geométrico, é caracterizado por ser um escoamento forçado. Deste modo fabricantes, projetistas e usuários fazerem uso da seguinte classificação:

- Condutos livres: são aqueles que operam por gravidade, com a superfície do líquido em contato com a pressão atmosfera.
- Condutos forçados: são aqueles que operam por recalque ou por gravidade, porém pressurizados.

De um modo geral pode se referir aos tubos quanto à sua classe de pressão padronizada, ou quanto à padronização da espessura de paredes. Exemplificando:

- Padronização de espessura: pode ser especificado tubo de Ferro Fundido k7, que por sua vez refere-se à espessura de parede. De um modo geral o ferro fundido pode ter sua espessura (sem liner) determinada fazendo, $t = K(0{,}5 + 0{,}001.D)$ sendo K= 7, 9, 12.

- Padronização da Classe de Pressão ou Pressão Nominal: Outra forma de especificar a classe do tubo é a referência a pressão nominal, tubo R-PVC Pn 10 ou ainda C-PRFV Cl 10, referindo a pressão que dá nome ao tubo e que limita a máxima pressão permanente quando em serviço. A espessura de parede dos tubos plásticos se relaciona com a pressão nominal máxima de serviço através da expressão

$$Pn \leq \left(\frac{HDB}{Fs}\right) \cdot \left(\frac{2.E_t.(t_t - t_l)}{D}\right) \tag{2.12}$$

Onde:

HDB = Projeto hidrostático básico, que na verdade é o alongamento para 50 anos, extrapolado a partir do ensaio de 10.000 horas realizado com o tubo.

E_t = Módulo elástico do tubo

t_t = Espessura total de parede do tubo

t_l = Espessura do liner, pintura ou barreira química utilizada

D = Diâmetro médio do tubo

Fs = Fator de segurança.

2.3.2 Rigidez

Ao referir-se simplesmente a um tipo de tubo específico, como por exemplo, tubo de ferro fundido, tubo de aço ou tubo de fibra de vidro e tentar entender ou analisar os seus respectivos comportamentos depois de instalados, pode parecer algo caótico ou mesmo sem uma explicação racional.

O que pode haver de semelhante entre um tubo de PVC, um tubo de aço carbono ou um tubo de fibra de vidro?

Aparentemente é uma questão difícil de ser respondida. No entanto, ao classifica-los quanto ao seu comportamento e sua capacidade de deformação, tudo começa a fazer sentido.

Ao agrupar os tubos dentro desse critério e analisar o comportamento de um grupo ou família, é possível descrever seus respectivos comportamentos, adotar padrões de cálculos e especificar critérios de instalação. Como pode ser percebido, os cálculos e aproximações de projetos são afetados por estas características.

Em função do exposto os tubos passaram a ser classificados em tubos rígidos ou flexíveis.

As cargas de solo são suportadas diretamente pelos tubos rígidos, devido a sua elevada rigidez circunferencial de flexão, enquanto que os tubos flexíveis descarregam grande parte das cargas contra o apoio lateral do solo de modo a resistir a estas cargas sem grandes deformações, necessitando por isto muito menor resistência que os tubos rígidos.

"Um tubo rígido é análogo a uma viga enquanto que um tubo flexível pode ser comparado a um arco. Um tubo rígido é definido como uma estrutura, que sob ação de uma carga, no seu limite de capacidade, não se deforma suficientemente para ativar a ação passiva do solo lateral no qual está instalado", (YOUNG & TROT, 1984, p.2).

Tubos cujos valores de rigidez se encontram na faixa intermédia, isto é, entre os valores observados para tubos rígidos e flexíveis, são chamados de tubos semi-rígidos ou semiflexíveis.

A rigidez do tubo sempre foi um tema polêmico, pois embute interesses econômicos, entretanto faz parte da característica intrínseca de cada material aplicado para fabricação de cada tipo de tubo e seu conhecimento é importante para se determinar à capacidade de suportar a ação cargas externas e sobrecargas transitórias para cada caso.

Para efeito de instalação de tubos enterrados é interessante conhecer os diversos aspectos que envolvem a capacidade de deformação dos tubos.

No Brasil, a elaboração de normas próprias tem sido um ato meramente copiativo de normas Americanas ou Européias, sem o compromisso de desenvolver uma pesquisa aplicada, voltada para nossas condições específicas de solo.

Os conceitos utilizados por estas normas são antigos, sendo que a classificação dos tubos em condutos rígidos, semi-rígidos e flexíveis é feita em função da sua capacidade de se deformar desenvolvida isoladamente, sem levar em

consideração a natureza e a capacidade de deformação dos solos onde serão instalados.

Segundo a AMERICAN WATER WORKS ASSOSSIATION, AWWA, as tubulações podem ser classificadas segundo sua capacidade de deformação vertical, ΔD/D, conforme ilustrado na tabela 2.3:

Tabela 2.3: Classificação dos tubos segundo sua capacidade de deformação.

Classificação	Capacidade de deformação $\left(\Delta D/D\right)$
Tubulações rígidas	se deformam até ΔD/D ≤ 0,001
Tubulações semi-rígidas	se deformam até ΔD/D ≤ 0,03
Tubulações flexíveis	se deformam até Δ D/D ≤ 0,05

O conceito de tubo rígido e flexível, adotado pela AWWA foi introduzido por MARSTON[1] (1930) e conceitua rigidez e flexibilidade, com base somente na capacidade de deformação do tubo ou conduto. "Entretanto a definição mais atual e exata sobre o comportamento das tubulações deve-se a GUMBEL[2] ET AL" apud VIANA & BUENO, (1998).

Para desempenhar o trabalho de um tubo flexível, recomenda-se que este deva ser capaz de deformar-se, ovalizando-se suficientemente, isto é, sua seção transversal deve ser capaz de experimentar uma diminuição de diâmetro vertical de 5%, enquanto o seu diâmetro horizontal verifica um aumento proporcional, sem que ocorram falhas. Tubos rígidos quase não se deformam, isto é a redução do diâmetro vertical não ultrapassa 0,1% do seu diâmetro original.

A deformação citada é normalmente expressa como uma percentagem do diâmetro pelo qual o diâmetro vertical diminui, sendo que a norma AWWA (1996) considera como 15% a deformação mínima que um tubo flexível deve suportar

[1] MARSTON, A. (1930). *The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments.* Iowa Engineering Experimental Station, Ames, Bull. 96, p. 36.
[2] GUMBEL, J. E.; O'REILLY, M.P.; LAKE, L. M.; CARDER, D. R. (1982), *The Development of a New Desing Method for Buried Flexible Pipes.* In: Proceedings Europipe, Bastle apud VIANA, P.M.F.; BUENO, B.S. (1998), *Condutos Enterrados: Redução de Esforços Sobre a Estrutura,* São Carlos, USP, p.8.

isoladamente, sem o apoio do solo, não ocorrendo qualquer risco de dano ao material.

YOUNG & TROT (1984), observam que para a flexibilidade ter importância significativa na aplicação de tubos flexíveis, as cargas verticais devem produzir uma ovalização da ordem de 5% a 10% sobre os mesmos.

Um tubo de aço de parede fina é um exemplo típico de tubo flexível, do mesmo modo um tubo de ferro fundido nodular de grande diâmetro pode ser um exemplo de um tubo semi-rígido.

Apesar da norma classificar os tubos de concreto protendido como rígido, quando os mesmos tiverem grandes diâmetros também podem se comportar como tubos semi-rígidos.

A rigidez de um tubo ou conduto qualquer "R_c" pode ser determinada de maneira simples através do ensaio de pratos paralelos, submetendo um segmento de comprimento unitário L a uma força F que seja capaz de produzir a deformação máxima Δy recomendada pela respectiva norma e aplicando-se a expressão (2.13).

$$R_c = \frac{0{,}149.F}{\Delta y.L} \tag{2.13}$$

Entretanto pode ser conveniente estimar o valor da rigidez, neste caso deve ser considerado que a rigidez circunferencial é produzida pelo produto do módulo de elasticidade de flexão da parede do tubo, E', e o momento de inércia, I, para um segmento unitário de tubo, dividido pelo seu raio horizontal elevado ao cubo.

$$R_c = \frac{E'.I}{(r + \Delta y)^3} \tag{2.14}$$

O momento de inércia da parede para um comprimento unitário de tubo pode ser calculado em função da espessura, t_t, elevada ao cubo.

$$I = \frac{t_t^3}{12} \tag{2.15}$$

Percebe-se desta forma que a rigidez de um tubo depende do material constituinte representado pelo seu módulo E', da espessura da parede t_t e do raio r.

Embora as fórmulas apresentadas relacionem rigidez ao raio, também é comum ver relações com o diâmetro. Embora as fórmulas apresentadas relacionem rigidez ao raio, é comum ver relações com o diâmetro.

De acordo com sua rigidez o conduto poderá dispor ou não, de resistência própria suficiente para absorver as cargas que lhe são impostas. Quando isto não ocorre, ele passa a depender, então, do suporte lateral do solo para resistir a estas cargas. . Este mecanismo de transferência de cargas do conduto para o solo lateral e vice-versa é bastante complexo. A interação do sistema solo-tubo depende dos movimentos relativos entre solo e tubo, ocorrendo com maior intensidade, dentre todas as outras interações que surgem, em obras de instalações hidráulicas.

Sob o ponto de vista dos materiais constituintes, os tubos rígidos (concreto, ferro fundido cinzento, manilhas vidradas) não se deformam sem trincar, enquanto que por outro lado, os tubos flexíveis podem se deformar consideravelmente sem sofrer danos à sua estrutura (LINSLEY& FRANZINI, 1978).

Uma forma diferente da proposta por MARSTON e da adotada pela AWWA de se distinguir entre estruturas que tem rigidez suficiente para suportar as cargas aplicadas das que devem interagir com o solo para que desenvolvam esta capacidade, é através da comparação da rigidez do tubo ou conduto, R_c, com a do solo envolvente, R_s, pela determinação de um quociente denominado de rigidez relativa, R_R. VIANA & BUENO (1988), consideram que quando um conduto é instalado em uma vala, a distribuição das cargas que age sobre o sistema solo-conduto é governada principalmente pela rigidez relativa, R_R, e não somente pela rigidez do conduto, R_c, isoladamente. Esta relação entre a rigidez do solo e a rigidez do conduto dá uma nova dimensão na análise do comportamento de uma tubulação enterrada, não fazendo mais sentido a análise isolada do tubo.

A rigidez relativa é avaliada através da equação (2.16).

$$R_R = \frac{E_s^*}{R_c} \tag{2.16}$$

Onde:

- E_s^* é o módulo elástico do solo no estado plano.

GUMBEL[3] et al apud YOUNG & TROTT (1984), mostraram que para valores de R_R menores ou iguais a 10, condição em que a rigidez do conduto, R_c, é alta em comparação ao solo circunvizinho, mais de 90% das cargas de solo são suportada pela parede do tubo. Esta é uma situação onde o solo em nada contribui.

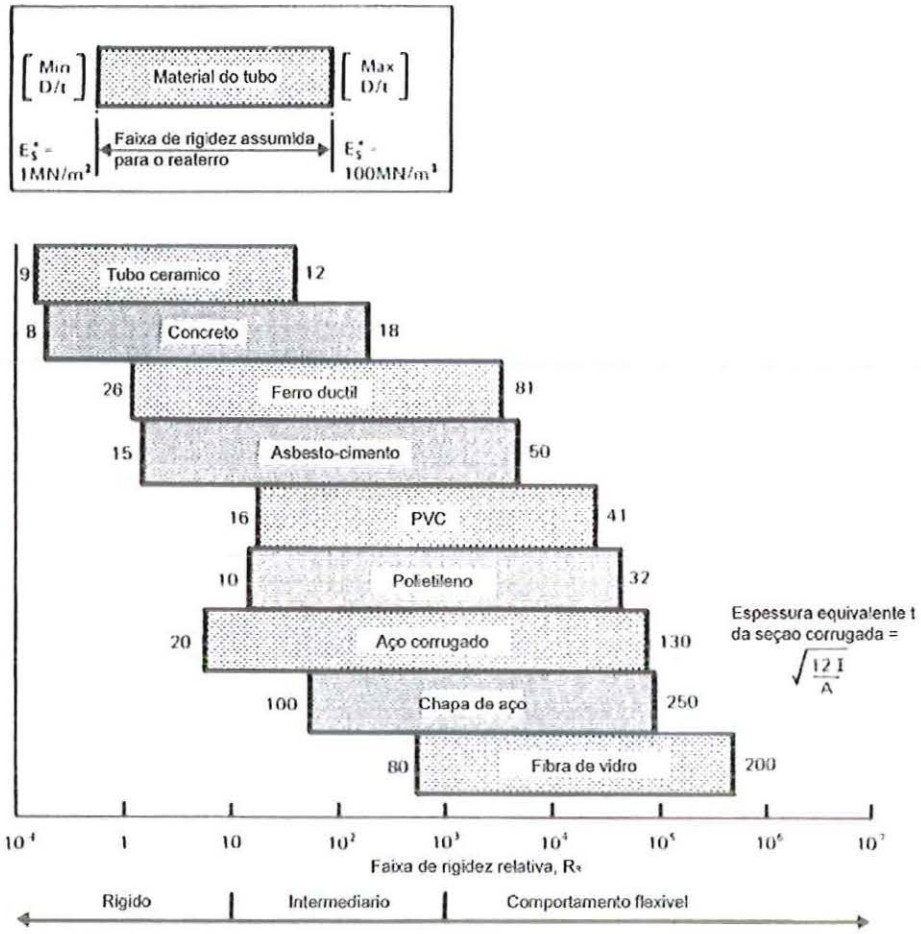


Fig. 2.7 – Comportamento de diversos tubos segundo sua rigidez relativa R_R, YOUNG & TROTT, (1984)

[3] GUMBEL, J.E., O'REILLY, M.P., LAKE, L.M. & CARDER, D.R. (1982). *The Development of a New Design Method for Buried Flexible Pipes.* Proc. Europipe apud YOUNG, O.C., and TROTT, J.J. (1984) London, Elsevier Aplied Science Publishers.

Para valores de rigidez relativa, R_R, intermediária, entre 10 e 1000, a proporção das cargas suportada pelo tubo sofre uma redução de 90% para até 10%, sendo esta redução proporcional ao aumento da rigidez relativa R_R.

Os valores de rigidez relativa, R_R, maiores que 1000 caracterizam tubos flexíveis. Nesta faixa de rigidez o tubo é responsável por suportar menos do que 10% das cargas de solo, sendo que a maior parte das cargas é descarregada para o solo de envolvimento.

O gráfico apresentado pela figura 2.7 ilustra o comportamento de diversos tipos de tubos considerando a faixa de variação da rigidez relativa R_R. Os valores da rigidez relativa R_R observadas para um determinado tipo de tubo podem variar principalmente em função da rigidez do conduto, com o aumento ou diminuição do diâmetro ou ainda com a mudança de classe de pressão, modificando a relação espessura/diâmetro (t/D), bem como pela variação da natureza e rigidez do solo E_S^*.

Pode-se interpretar os valores de rigidez como o de uma constante de mola, imaginando-se que a carga a ser aplicada será absorvida por uma associação de molas, de tal forma que a mola de maior rigidez absorverá maior parcela de carga. Deste modo quando se obtém um valor elevado para a rigidez relativa "R_R" maior será a responsabilidade do solo envolvente, na medida em que este deve absorver uma maior parcela da carga aplicada. Sendo assim, quando a rigidez do solo for maior que a rigidez do tubo, o solo passa a ser representado por duas molas maiores, com elevado valor de rigidez enquanto que o tubo será representado por uma mola menor, de rigidez inferior, e a parcela de carga a ser absorvida pelo solo envolvente, será proporcional à capacidade das molas.

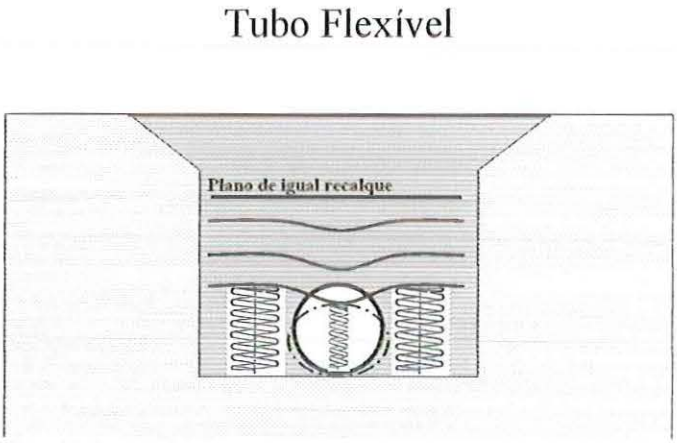


Fig. 2.8 – Esquema do comportamento do tubo flexível enterrado.

O tubo flexível, representado pela mola menor, se deforma mais e absorve uma menor parcela de carga que as colunas laterais de solo, representadas aqui pelas molas mais poderosas, que por serem mais rígidas, se deformam menos absorvendo a maior parcela de carga, como representado na figura 2.8.

Também pode vir a ocorrer à situação inversa, onde um baixo valor da rigidez relativa "R_R" indica que a estrutura do conduto passa a ter uma maior responsabilidade, que por ser mais rígida que o solo adjacente absorve para si a maior parcela de cargas aplicadas, conforme figura 2.9.

Tubo Rígido

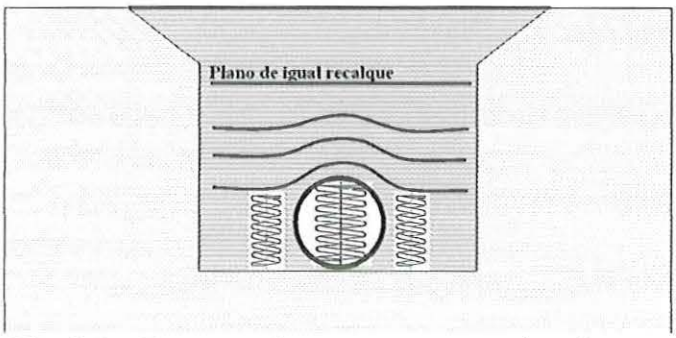


Fig. 2.9 – Esquema do comportamento do tubo rígido enterrado.

2.4 Classes de instalação

Diversos manuais de engenharia voltados para projeto e instalação de tubos enterrados se referem a análise experimental e estudos publicados originalmente por MARSTON, que começou a trabalhar com este assunto no Iowa State University, Ames, USA, no inicio do século passado, onde publicou um uma tese em 1913 apresentando a teoria para cálculo de cargas sobre tubos instalados em valas. Para a finalidade de cálculo das cargas, é importante conhecer as condições em que o tubo deverá ser instalado, assim é conveniente fazer uma abordagem sobre as classes de instalação.

2.4.1 Instalação em valas ou trincheira

A instalação de um tubo em uma vala ou trincheira, relativamente estreita, é feita escavando-se um maciço terroso. Depois de regularizado o fundo da trincheira e lançado o tubo, procede-se o recobrindo com solo compactado.

MARSTON[1] apud YOUNG & TROTT (1984) baseando-se na análise do arqueamento de grão em silos desenvolvida originalmente por JANSEN, modificou a equação (2.3), apresentada anteriormente.

Considere um tubo instalado em uma trincheira, com uma altura de recobrimento H, tendo as paredes verticais, a largura da trincheira é B_d, conforme ilustra a figura 2.17.

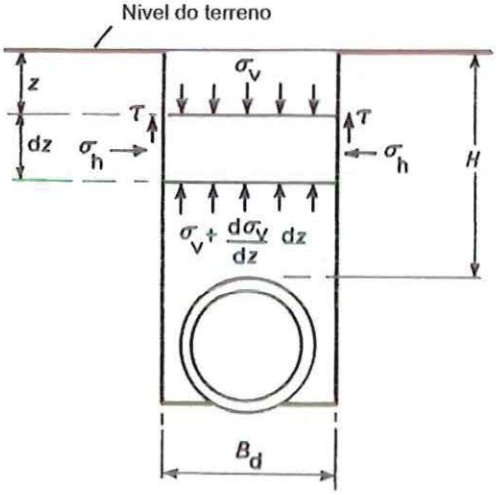


Fig. 2.10 – Diagrama de forças para tubo instalado em trincheira estreita YOUNG & TROTT (1984)

[1] MARSTON, A. (1930), *The Theory of External Load on Closed Conduit in the Light of the Latest Experiments,* Bul, Iowa Eng. Expt. Station apud YOUNG, O.C . &. TROTT, J.J (1984), *Buried Rigid Pipes, Structural Design of Pipelines*, London, Elsevier Applied Science Publishers, p32.

Tomando um elemento de solo infinitesimal, de espessura *dh* situado a uma profundidade *H*, em relação à superfície da trincheira, supondo ainda que a carga devido à sucessão de camadas de solo é distribuída uniformemente através da largura da trincheira B_d e consistirá do peso próprio da camada de solo *dh* mais o peso transmitido a ela pelas camadas superiores menos às forças cisalhantes verticais desenvolvidas em decorrência do atrito com as duas faces laterais da trincheira.

O recobrimento será feito com o solo de origem até o nível do terreno natural. A densidade do solo e o atrito são constantes ao longo de toda a profundidade *H*. As tensões de cisalhamento, que atuam diretamente nas paredes verticais da trincheira, são proporcionais a pressão horizontal ativa do recobrimento. Marston tomou o coeficiente de reação do solo de Rankine para as referidas tensões.

$$k_r = \frac{1 - sin\phi}{1 + sin\phi} = tg^2\left(45^o - \phi\right) \tag{2.17}$$

Se μ' é o coeficiente de atrito entre o solo de reaterro e as paredes laterais da trincheira e σ_v é a carga vertical total sobre o elemento infinitesimal, então:

$$\sigma_v + d\sigma_v = \sigma_v + \gamma.B_d.dh - 2.K_r.\mu'.\frac{\sigma_v}{B_d}.dh \tag{2.18}$$

A solução da equação diferencial é:

$$\sigma_v = \gamma.B_d^2.\left[\frac{1 - e^{\left(-2.K_r.\mu'.\frac{h}{B_d}\right)}}{2.K_r.\mu'}\right] \tag{2.19}$$

Simplificando a equação (2.19) com a introdução do coeficiente C_d, equação (2.2), obtém-se:

$$\sigma_v = \gamma.B_d^2.C_d \tag{2.20}$$

Tabela 2.4 - Faixa de valores de $\mu' = k_r.tg\phi$ (BULSON, 1985)

$k_r.tg\phi$	Tipo de solo
0,190	Material granular sem coesão
0,165	Areia e pedregulho
0,150	Solo de primeira saturado
0,130	Argila ordinária
0,11	Argila saturada

A tabela 2.4 fornece os valores do coeficiente de atrito das paredes da trincheira.

A figura 2.11 mostra uma família de curvas a partir da relação entre H/B_d e C_d, onde:

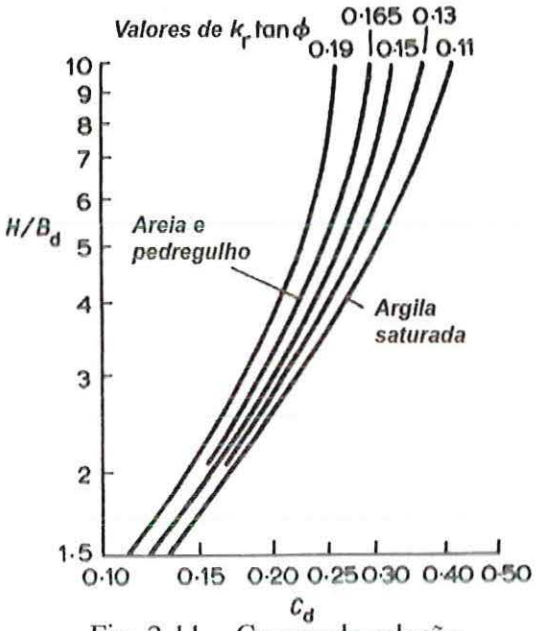


Fig. 2.11 – Curvas de relação entre H/B_d e C_d (BULSON, 1985)

$$C_d = \frac{1 - e^{\left[-2.k_r.\mu'.\left(\frac{H}{B_d}\right)\right]}}{2.k_r.\mu'} \qquad (2.21)$$

Depois de encontrar o valor para o coeficiente de atrito $\mu'=K_r.tg\phi$, e a relação entre H/B_d, o valor de C_d pode ser extraído das curvas apresentadas na figura 2.11.

"As características do solo de enchimento colocado entre as paredes do tubo e da vala, ou seja o recobrimento primário, e o modo de sua colocação exerce influência preponderante no comportamento estrutural do tubo..." (ZAIDLER, 1983, p.27).

Os cuidados tomados no manuseio, no armazenamento e principalmente na instalação dos tubos, sejam eles rígidos ou flexíveis, tem uma influência marcante em seu desempenho quando da sua entrada em serviço (YOUNG & TROTT, 1984).

"O valor da carga resultante [sobre o tubo] dependerá da rigidez do tubo, de como foi assentado e da natureza do material com que será recoberto" (LINSLEY & FRANZINI, 1978, p.366).

2.4.2 Tipos de trincheiras

As trincheiras podem ser sub divididas em três tipos básicos:

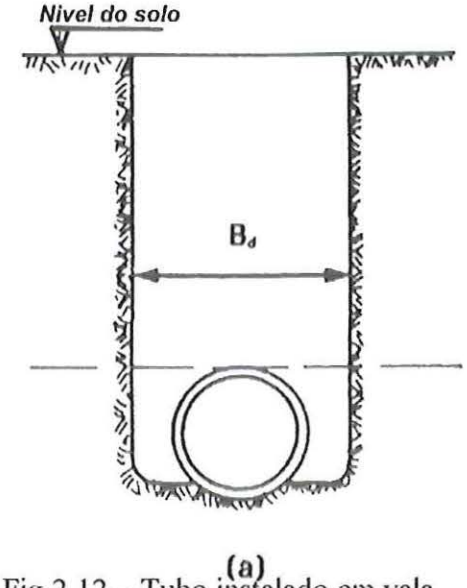


Fig 2.12 – Tubo instalado em vala com faces planas (ZAIDLER, 1983).

a) Trincheira com faces planas: neste caso as paredes da vala são cortadas no sentido vertical e a largura da trincheira é uniforme B_d, figura 2.12.

b) Trincheira com lados inclinados: SCHILICK demonstrou que para trincheiras com lados inclinados, figura 2.13, ou com sub vala (sub trincheira ou ainda lados escalonados), a largura Bd deve ser tomada ao nível da geratriz superior do tubo. (YOUNG & TROTT, 1984).

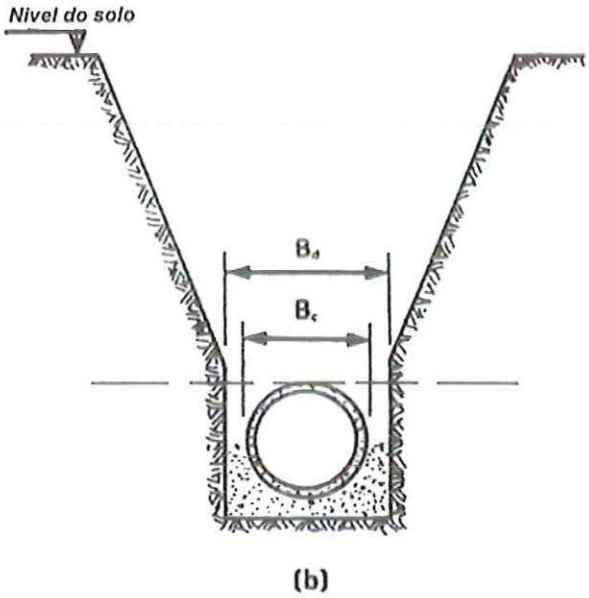
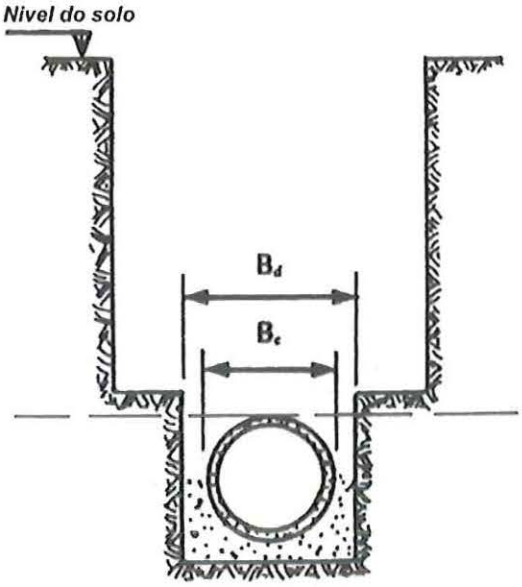


Fig 2.13 – Tubo instalado em vala com lados inclinada (ZAIDLER, 1983).

A abertura B_d deve oferecer as condições mínimas para que os trabalhos de instalação possam ser realizados com eficiência e segurança.

c) Trincheira com lados planos escalonados (ou com sub trincheira): em situações onde a largura da vala é muito grande é conveniente à construção da sub vala, o que permite a redução da carga sobre o conduto, figura 2.14.



(c)

Fig 2.14 – Tubo instalado em vala com sub vala (ZAIDLER, 1983).

Para esta família de instalação, "os planos verticais de cisalhamento, que passam pelas laterais direita e esquerda do tubo, estão localizados dentro do solo do reaterro. Assim o ângulo de atrito interno do solo dependerá do movimento relativo entre o prisma interno e os dois prismas externos e não do movimento relativo entre o solo de reaterro e as faces verticais do solo natural" (BULSON, 1985, p.55).

2.4.3 Instalação em aterros.

Dá-se o nome de *instalação em aterros, conduto saliente* ou *instalação com projeção positiva* ao tipo de instalação em que um tubo é lançado com a geratriz superior se projetando acima do nível do terreno natural, figura 2.15.

Depois de fazer o aterro com solo adequado e compactado, deverá ser escavada uma trincheira e então instalar o tubo normalmente.

O recobrimento primário é levado a cabo fazendo-se uma compactação cuidadosa. O solo adjacente ao prisma central, que se encontra imediatamente acima da estrutura, é então completado com o mesmo solo do restante do enchimento.

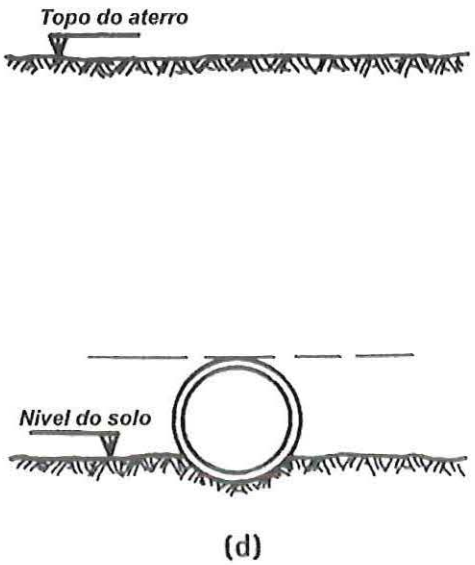


Fig 2.15 – Tubo instalado em condição de aterro (ZAIDLER, 1983).

Na instalação de condutos salientes, a intensidade e direção das cargas de solo, que atingem a estrutura, são influenciadas pela posição relativa de dois planos: "*plano de igual recalque*" e "*plano crítico*".

"O *plano crítico* tangencia a geratriz superior do conduto e pode se deformar em função dos recalques diferenciais".

O plano de igual recalque é um plano onde os recalques diferenciais, que ocorre entre os

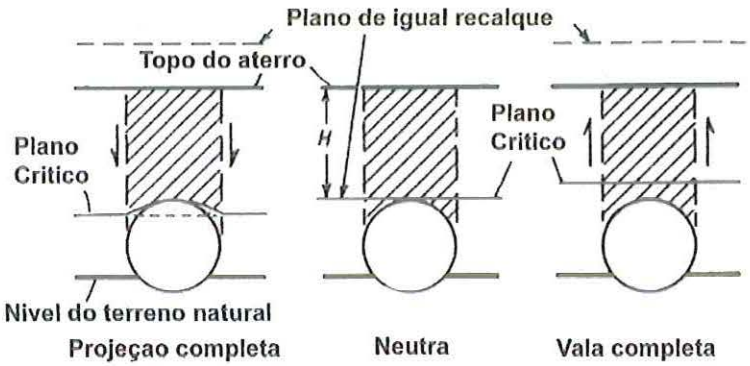


Fig. 2.16 – Condutos com projeção positiva completa (BULSON, 1985)

dois prismas externos e o prisma interno, se anulam.

Acima do plano de igual recalque não há nenhum movimento entre os prismas interno e portanto as forças de atrito também se anulam.

A posição do plano de igual recalque pode estar acima da superfície do aterro (figura 2.16) ou abaixo da superfície do aterro (figura 2.17).

a) Na primeira situação, o *plano de igual recalque* esta acima da superfície do aterro, os planos verticais de cisalhamento se desenvolvem até que atinjam o nível da superfície. Pode dar origem a uma *condição completa de vala* ou de uma condição de *projeção completa do tubo*, dependendo da rigidez relativa e da posição do plano crítico.

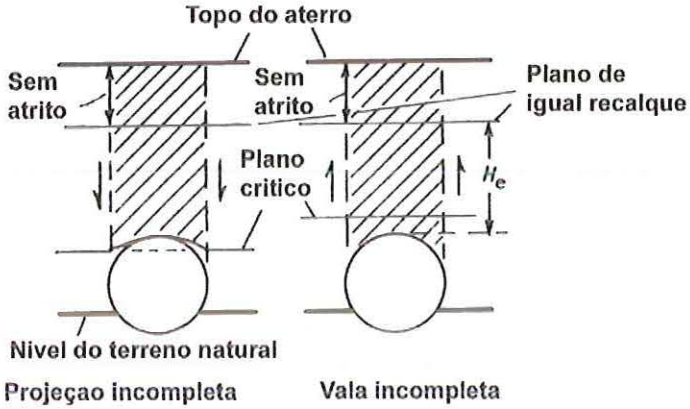


Fig. 2.17 – Condutos com projeção positiva incompleta (BULSON, 1985)

b) No segundo caso, o que o *plano de igual recalque* esta abaixo do nível do aterro e os planos verticais onde se desenvolvem as tensões de cisalhamento se chegam até este plano. Dependendo do comportamento do plano crítico pode ser gerada uma das duas situações: *condição incompleta de vala* ou *projeção incompleta do tubo*.

c) O caso particular onde o *plano de igual recalque* é um plano que está posicional tangencialmente à geratriz superior do tubo e dá, então, origem a *condição neutra*.

Existem três possibilidades para o posicionamento do *plano crítico*, são elas:

a) Quando o recalque do *topo da estrutura* é menor que o recalque sofrido pelo *plano crítico*, neste caso em que o tubo é mais rígido que o solo, resulta em forças de cisalhamento no sentido *descendente* que se desenvolvem nos *prismas externos* do solo. No prisma interno, as forças de cisalhamento têm sentido inverso, isto é se desenvolvem no sentido ascendente, resultando em um aumento da concentração de pressão no topo da estrutura do tubo, muito maior do que quando comparamos somente com a resultante da aplicação do peso próprio do prisma de solo sobre o tubo.

b) O recalque do *topo da estrutura* do tubo é igual ao recalque do *plano crítico*, caso particular em que a rigidez da estrutura é idêntica a rigidez observada pelo solo, desta forma não se desenvolve forças de cisalhamento devido ao fato de não haver movimento relativo entre o prisma interno e os prismas externos. Para estruturas semi-rígidas, o *plano de igual recalque* coincide com o *plano crítico*.

c) A terceira condição ocorre quando o recalque do *topo da estrutura* (tubo flexível) é maior que o recalque que se desenvolve no *plano crítico* resultando em forças de cisalhamento, com o sentido ascendente, que se desenvolvem nos prismas externos de solo. No prisma interno, o sentido de desenvolvimento das forças cisalhantes é descendente, condição de vala em que se observa uma redução sensível das cargas de solo que atua no topo do tubo, quando comparada ao peso hidrostático do solo.

Observe que o plano de igual recalque influencia o comportamento do sistema de estrutura solo-tubo e evidentemente no desenvolvimento do cálculo.

a) Condição de projeção positiva completa

A análise do arqueamento é feita considerando o sentido atuante das tensões de cisalhamento, figura 2.22, assim a reversão na direção das forças de cisalhamento (descendentes), nos leva a equação (2.3) elaborada por MARSTON, porém agora

com o sinal trocado. Quando tomado o valor da coesão igual a zero, a tensão vertical do solo é dada pela equação (2.22), (BULSON 1985), (YOUNG & TROTT, 1984).

$$\sigma_v = \frac{B_c.\gamma}{2.k_r.tg\phi}.\left[-1+e^{\left(+k_r.tg\phi.\frac{2.H}{B_c}\right)}\right]+q.e^{\left(+k_r.tg\phi.\frac{2.H}{B_c}\right)} \tag{2.22}$$

Onde:

- B_c é a largura total do conduto

Condição de vala completa

A condição de vala completa, representada na figura 2.22, com as forças cisalhantes coincidentes à condição dada pela expressão de MARSTON, porém com B_d sendo substituído por B_c, gerando a expressão (2.23), (BULSON 1985), (YOUNG & TROTT, 1984).

$$\sigma_v = \frac{B_c.\gamma}{2.k_r.tg\phi}.\left[1-e^{-k_r.tg\phi.\frac{2.H}{B_c}}\right]+q.e^{\left(-k_r.tg\phi.\frac{2.H}{B_c}\right)} \tag{2.23}$$

b) Condição de projeção positiva incompleta

A condição de projeção positiva incompleta está representado na figura 2.23. Nesta situação se aplica a equação (2.23), para a condição de projeção completa, mas com a profundidade do recobrimento modificada, igualando-se H_e à distância do topo do tubo até o plano se igual recalque, considerando ainda uma sobrecarga extra, devido à ação do peso de solo na distância vertical (H-H_e), (BULSON, 1985).

$$\sigma_v = \frac{B_c\gamma}{2.k_r.tg\phi}.\left[-1+e^{\left(+k_r.tg\phi.\frac{2.H_e}{B_C}\right)}\right]+\left[q+\left(H-H_e\right).\gamma\right]e^{\left(+k_r.tg\phi.\frac{2.H_e}{B_c}\right)} \tag{2.24}$$

c) Condição de vala incompleta

A condição de vala incompleta, está representada na figura 2.23. Nesta condição se aplica a equação (2.24), para a condição de projeção positiva incompleta, trocando o sinal.

$$\sigma_v = \frac{B_c \gamma}{2.k_r.tg\phi} \cdot \left[1 - e^{\left(-k_r.tg\phi.\frac{2.H_e}{B_C}\right)} \right] + \left[q + (H - H_e).\gamma\right] e^{\left(-k_r.tg\phi.\frac{2.H_e}{B_c}\right)} \qquad (2.25)$$

"O método de cálculo para avaliar H_e foi desenvolvido inicialmente por MARSTON, mas SPANGLER introduziu uma modificação, que acabou sendo adotado posteriormente..., (YOUNG & TROTT, 1984, p37)."

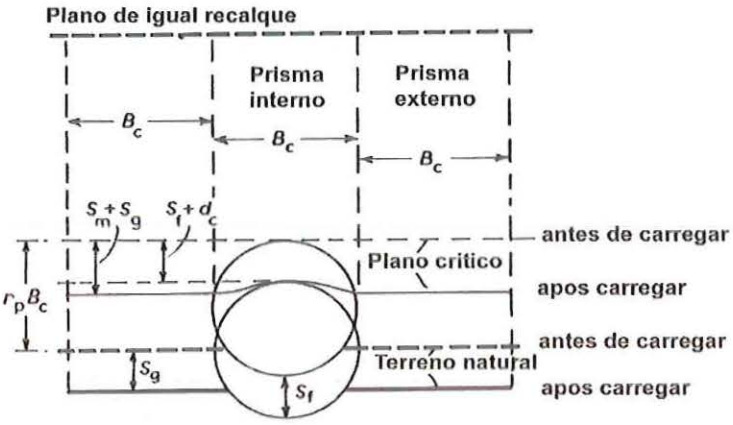


Fig. 2.18 – Notação para condição incompleta de vala (BULSON, 1985)

Considera-se que a largura efetiva de cada um dos prismas externos de solo seja igual à largura total do conduto, conforme ilustra a figura 2.18, então a carga total, para o plano crítico é $3.H.\gamma.B_c$, por unidade de comprimento do tubo, de forma que a soma das cargas nos prismas exteriores é dada pela equação (2.26):

$$3.H.\gamma.B_c - \sigma_v.B_c \qquad (2.26)$$

que vai atuar sobre a largura total dos prismas externos $2.B_c$.

Os recalques, também são mostrados na figura 2.24, onde S_f é o recalque descendente para a geratriz inferior do conduto, S_g é o recalque descendente da superfície do solo original, S_m é o recalque extra do plano crítico adjacente ao conduto, devido à ação da sobrecarga do enchimento, e d_c é o diâmetro vertical do

conduto ovalizado. Então o recalque relativo do plano crítico é dado pela seguinte equação:

$$\left(S_m + S_g\right) - \left(S_f + d_c\right) \tag{2.27}$$

E se dividirmos a equação (2.27) por S_m, obtemos a medida da deformação do prisma de solo interno em relação ao prisma de solo externo.

Esta relação é conhecida como *razão de recalque* r_{sd}, assim:

$$r_{sd} = \frac{\left(S_m + S_g\right) - \left(S_f + d_c\right)}{S_m} \tag{2.28}$$

A deformação do plano crítico ao nível da coroa do tubo [geratriz superior], relativo à deformação correspondente ao solo adjacente, é uma função do recalque total sofrido pela projeção do topo do tubo acima da superfície do solo e a relação desta projeção para o conduto de largura B_c é conhecida como a razão de projeção r_p.

$$r_p = \frac{h'}{Bc} \tag{2.29}$$

Então se diz que a projeção h' do tubo, mostrada na figura 2.24, é dada por $r_p.B_c$. Usando as relações r_{sd}, r_p e a equação (2.26), é possível mostrar que, para $c=0$:

$$\sigma_v = \frac{e^{\pm 2.k_r.\tan\phi.\left(\frac{H_e}{B_c}\right)} - 1}{\pm 2.k_r.\tan\phi} \cdot \left[\frac{\pm 1}{2.k_r.\tan\phi} \pm \left(\frac{q}{\gamma.B_c} + \frac{H}{B_c} - \frac{H_e}{B_c}\right) \pm \frac{r_{sd}.r_p}{3}\right] \pm \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{H_e}{B_c}\right)^2 + \ldots$$

$$\pm \frac{r_{sd}.r_p}{3} \times \left(\frac{q}{\gamma.B_c} + \frac{H}{B_c} - \frac{H_e}{B_c}\right) \cdot e^{\left(\pm 2.k_r.\tan\phi.\frac{H_e}{B_c}\right)} - \frac{1}{2.k_r.\tan\phi} \cdot \frac{H_e}{B_c} + \ldots$$

$$\mp \frac{H}{B_c} \cdot \frac{H_e}{B_c} \mp \frac{H_e}{B_c} \cdot \frac{q}{\gamma.B_c} \mp r_{sd}.r_p.\left(\frac{H}{B_c} + \frac{q}{\gamma.B_c}\right) = 0 \tag{2.30}$$

Segundo BULSON (1985), os *sinais superiores* da equação (2.30) são validos para a condição de projeção positiva incompleta, enquanto que os *sinais inferiores* refletem a condição de vala incompleta.

A equação (2.30) pode ser resolvida numericamente para obter os valores de H_e, para valores dados de H/B_c, r_{sd}, r_p e $k_r.tg\phi$.

- Se $H_e>H$, existe uma *projeção positiva completa* do tubo ou condição de aterro, e a pressão σ_v sobre a estrutura é encontrada pela equação (2.22).
- Se $H_e<H$, existe uma condição de *projeção incompleta*, e σ_v é obtido a partira da equação (2.24).
- Usando esse método, a relação entre H/B e $\sigma_v/\gamma.B_c$ foi considerado por SPANGLER para uma faixa de valores de $r_{sd}.r_p$, quando $kr.tan\phi=0,19$ (material granular sem coesão). Este resultado é mostrado na figura 2.19, e isto é geralmente tomado para figuras baseadas em $kr.tan\phi=0,19$ podem ser selecionados com razoável precisão para trabalhar com valores seguros para muitos projetos de tubulações.

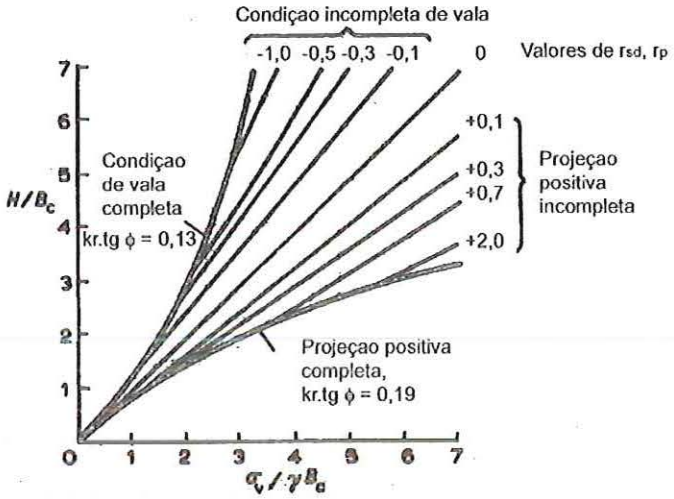


Fig. 2.19 – Relações entre H/B_c e $\sigma_v/\gamma.B_c$, para Condutos Salientes (BULSON, 1985)

As relações entre H/Bc e $\sigma v/\gamma Bc$ podem ser extraídas da figura 2.19.

SPANGLER[2] apud VIANA & BUENO (1988), recomenda valores para razão de recalques, tabela 2.5, para aplicação em projetos.

[2] SPANGLER, M.G. (1951), *Soil Enginnering*, AMES, IOWA, E.U.A, International Textbook, Company, apud VIANA, P.M.F &BUENO, B.S. (1998), São Carlos, SP, EESC-USP.

Tabela 2.5 – Valores para razão de recalque. YOUNG & TROTT (1984)

CONDIÇÕES	RAZÃO DE RECALQUE (R_{sd})
Conduto rígido, fundação de rocha ou solo indeformável.	+1
Conduto rígido em fundação de solo natural.	+0,5 a +0,8
Conduto rígido em fundação de material que se desloca em relação ao solo adjacente.	0 a +0,5
Conduto flexível com lados pouco compactados.	-0,4 a 0
Conduto flexível com lados bem compactados.	-0,2 a +0,8

2.4.4 Tubos instalados em trincheira induzida

Em 1920, pesquisando aplicações de condutos instalados em trincheiras abertas em aterros, MARSTON propõem o método da "trincheira induzida" com o propósito de dar aos condutos salientes as vantagens inerentes dos condutos instalados em valas, (VIANA & BUENO, 1998).

Segundo OSWELL & SLADEN (1988), os ensaios realizados por MARSTON por volta de 1920, demonstram que para um tubo instalado com uma altura de recobrimento de 6 metros, em condição de aterro, a concentração de carga sobre o tubo é de 1,90 vezes o peso hidrostático do solo sobre ele. Com a incorporação da camada flexível as cargas perceberam uma redução da ordem de 40% em relação às cargas originais.

Basicamente o método da trincheira induzida consiste em se fazer um aterro com solo adequado e bem compactado, em seguida escavar uma trincheira para então o tubo ser instalado normalmente e seguir com o reaterro até atingir um nível com cerca de um diâmetro acima da sua geratriz superior. O solo de envolvimento lateral deve ser executado fazendo-se uma compactação cuidadosa, enquanto que o solo que compõem o prisma central imediatamente acima do topo da estrutura deve apenas receber apenas uma compactação manual moderada. Neste ponto, interrompe-se a execução do reaterro, sendo introduzido uma camada de material bem

compressivo, como por exemplo, solo fofo, palha, ou materiais sintéticos adequados e a partir daí o aterro é completado de maneira usual. As dimensões usuais da camada compressiva são: altura e largura iguais à largura do conduto B_c, ou altura igual à metade de B_c.

A função da camada compressiva é dotar o prisma central de uma maior capacidade de se deformar do que os dois prismas laterais de solo, desenvolvendo forças cisalhantes ascendentes, aliviando as tensões sobre o prisma central, que se apóia nos prismas laterais, como se estivessem comprimindo. Chama-se este fenômeno de arqueamento do solo por indução. Deste modo, evita-se a concentração de tensões sobre o topo da estrutura, promovendo uma distribuição de tensões para o solo adjacente.

A figura 2.20 faz a comparação de casos típicos de instalação de condutos enterrados, em vala e saliente positivo, com o método da trincheira induzida.

a) em valas ou trincheiras – figura 2.20a.
b) saliência positiva – figura 2.20b.
c) saliência positiva, com trincheira induzida – figura 2.20c.

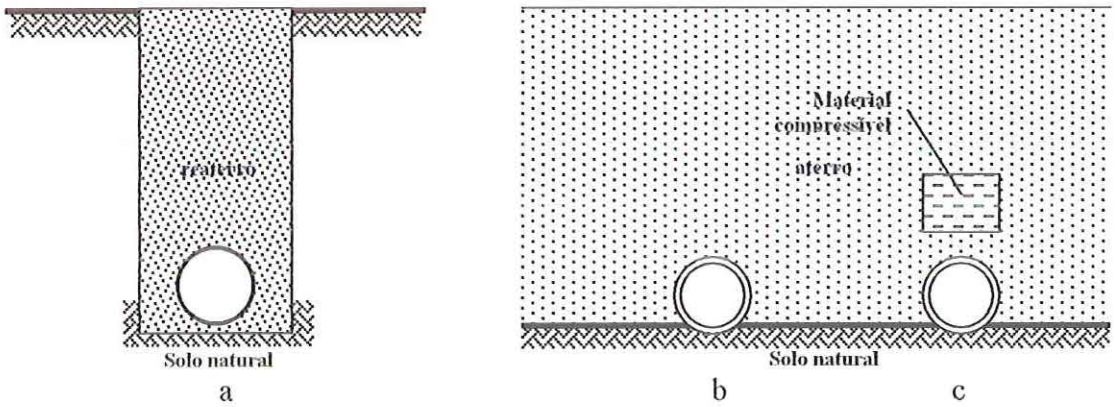


Fig. 2.20 - Métodos construtivos de condutos enterrados (SLANDEN & OSWELL, 1988).

SLANDEN& OSWELL (1988) fazem uma comparação bem esclarecedora sobre condição de vala ou trincheira e condição de aterro.

Condição de vala: Se um tubo é instalado em uma vala estreita, figura 2.20-a, o prisma central tende a desenvolver uma maior capacidade de deformação do que os prismas laterais, originando tensões de cisalhamento devido ao movimento relativo entre os prismas externo e interno, através dos planos de cisalhamento que se erguem pelas laterais do conduto. Deste modo o prisma central tem uma redução das tensões que são descarregadas para os prismas laterais.

Condição de aterro: De maneira oposta, quando um tubo rígido é instalado diretamente sobre a superfície do solo natural com saliência positiva, figura 2.20-b, um aterro é construído diretamente em torno do tubo este tende a ser mais rígido que o solo envolvente, portanto arqueando menos do que o solo e concentrando as tensões sobre si, aliviando as tensões do solo adjacente.

Segundo SLANDEN & OSWELL (1988), o cálculo do carregamento para a trincheira induzida poderá ser estimado substituindo na equação de condutos de saliência negativa a largura do conduto, B_c, pela largura da vala, B_d. A variação do ângulo de atrito interno do solo ϕ' tem pequena influência nos resultados.

$$\sigma_v = \frac{B_d.\gamma}{2.k_r.tg\phi'}.\left[1 - e^{\frac{2.k_r.H.tg\phi'}{B_d}}\right] \tag{2.36}$$

A técnica da trincheira induzida tem recebido pouca atenção dos pesquisadores, de um modo geral. Os procedimentos de projeto bastante antigos no geral consideram uma condição geométrica em que a largura da camada compressível iguala-se ao diâmetro do conduto, figura 2.20-c. Isto pode variar de caso para caso, da mesma forma que outras variáveis do sistema podem interferir no valor final do arqueamento induzido. Na verdade não há nenhuma razão para acreditar que esta largura é ótima.

SLANDEN & OSWELL (1988), fizeram um relato histórico da utilização do método da trincheira induzida, indicando inclusive os resultados práticos obtidos. A tabela 2.6 condensa esses resultados.

Tabela 2.6 – Resumo dos casos históricos e seus resultados

AUTOR (ES)	*ANO*	*DESCRIÇÃO*	*CAMADA FLEXÍVEL*	*RESULTADO*
LARSEN	1962	Instalação Tubo de concreto Dn 1,68 m	Palha	Obteve um aumento de recobrimento de 10m para 17 metros. $\frac{\Delta H}{H_i} = 0,7$ ou 70%
TAYLOR	1973	Teste de campo com tubo de concreto Dn 1,2 m, recobrimento de 9 m	Não informado	Obteve uma redução de esforços de aproximadamente 50%
SHEER & WILLET	1969	Bueiro de concreto Dn 5,60 m,	Camada de 0,90 m de palha. h/B=0,16	A redução de carga foi cerca de 50%
DEEN	1969	Comparou dois tubos Dn 1,2 m, com e sem camada flexível	Não informado	O tubo sem a trincheira flexível falhou.
DAVIS & BACHER	1968, 1972	Descreve diversos ensaios	O material mais utilizado foi fardo de palha.	Não informado. Somente foi descrito
BACHER & KIRKLAND	1985	Instalação de tubos	150 mm de poliestireno em 2/3 do Dn	As tensões foram drasticamente reduzidas.

"Embora tenham diversos documentos históricos valiosos, nenhuma tentativa de desenvolver um critério de cálculo para projeto utilizando o método da trincheira induzida", SLANDEN & OSWELL (1988).

O esquema da instalação realizada em Sandstone, norte de Calgary, Alberta, está esquematizado na figura 2.21, a seguir, mostrando três instalações distintas, sendo uma realizada com um conduto com De 2,10m, instalado com uma camada flexível construída com palha enfardada e duas outras instalações utilizando um conduto com De 2,50 m, instalados com trincheiras induzidas de palha enfardada e poliestireno de densidade 150 kg/m^3.

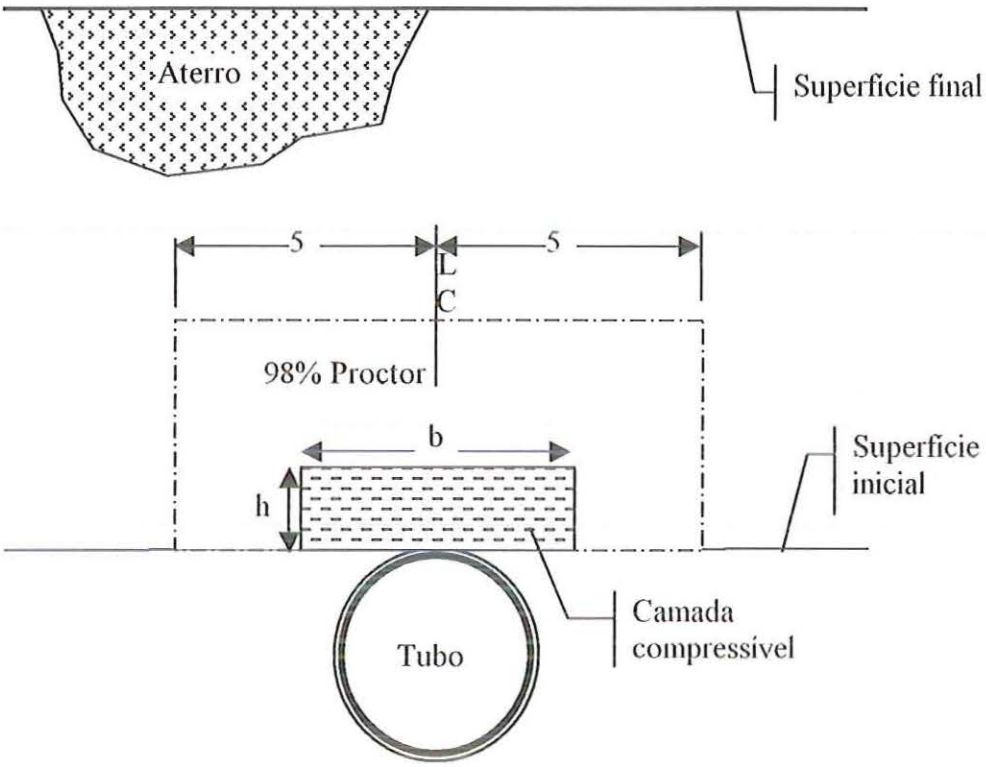


Fig. 2.21 – Projeto final adotado (SLANDEN & OSWELL, 1988)

Os resultados obtidos mostram que a pressão vertical sobre os tubos, tanto para camada flexível construída em palha como para a o poliestireno, foram da ordem de 20% a 40% da pressão de sobrecarga. As tensões horizontais medidas foram relativamente pequenas.

Tabela 2.7 – Características e eficiências obtidas (SLANDEN & OSWELL, 1988)

	Tubos de concreto		
	D = 2,1 m	D = 2,5 m	
Dimensões	Palha	Poliestireno	Palha
h	1,20	1,00	1,20
b	3,00	4,00	4,00
Eficiência	60% a 80%		

A compressão verificada, tanto para o poliestireno como para a palha foi da ordem de 40%.

"Baseado no monitoramento e nas avaliações dos dados o escoamento em longo prazo não devem apresentar nenhuma preocupação", (SLANDEN & OSWELL , 1988)

VIANA & BUENO (1998), realizaram uma série de sete ensaios utilizando uma combinação de trincheira induzida com uso de um geotextil, comparando com um ensaio de referência sem o uso de geotextil.

A figura 2.22 ilustra o esquema do ensaio de referência. A instalação foi realizada em uma caixa de reação, com envolvimento de um tubo de PVC em areia, adensada a 70% de densidade relativa e a camada flexível foi construída em areia fofa, com densidade relativa de 40%. As inclusões de geotexteis tinham o objetivo de melhorar a rigidez do solo, restringir os movimentos da estrutura flexível, aumentar a resistência a sobrecargas e reduzir os valores de momentos sobre a estrutura. Pôde-se verificar uma redução de tensões não somente acima do conduto como também em regiões a 25 cm acima do conduto, estas reduções são da ordem de 60% para as tensões sobre a estrutura e de 50% para as deformações. (VIANA & BUENO, 1998).

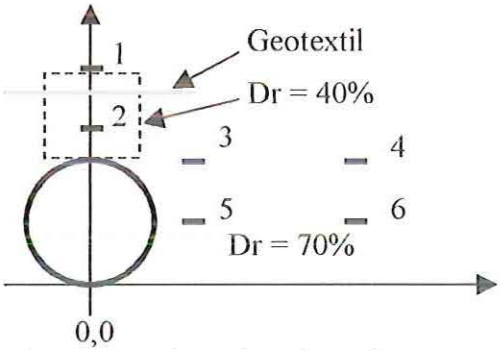


Fig. 2.22 – Eixos de referência (VIANA & BUENO, 1998).

Capitulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Introdução

A realização desta pesquisa envolveu trabalhos de laboratório, com ensaios e coletas de dados para posterior análise. Os materiais e equipamentos envolvidos nesta fase, bem como métodos utilizados e o programa de testes estão descritos neste capítulo. Para realização dos ensaios foi reformada uma antiga caixa de reação, utilizada anteriormente pelo Sr. Paulo Marcio Fernandes Viana.

3.2 A caixa de reação

A caixa de reação tem por objetivo simular as condições encontradas na instalação de uma tubulação em um aterro. Um alçapão, localizado na base da caixa, permite a simulação e analise do comportamento de um tubo flexível sobre a ação de cargas de solo, que pode ser simulada através do movimento descendente do alçapão.

A introdução de uma camada flexível, como a que se adota em instalações de condutos salientes através do uso da técnica da trincheira induzida, modifica a ação das cargas sobre o tubo e promove uma redistribuição das tensões no solo, através da diminuição das tensões do prisma central e de um acréscimo das tensões nos prismas adjacentes. O fenômeno da transferência das tensões entre os prismas central e adjacente se dá em decorrência da presença da camada flexível e é conhecido como arqueamento induzido do solo.

Para realização dos ensaios foi reformada uma antiga caixa de reação, construída em chapa de aço #3/16 pol e reforçadas com perfis de aço dobrados em

"U" medindo 4pol x 2 pol x # 1/8 pol, montado sobre uma base retangular com perfis reforçados. A caixa é dotada de um alçapão, instalado no fundo da caixa, com largura *B* igual a 100 mm. A finalidade do alçapão é permitir a simulação de efeitos de deflexões verticais verificados em tubos flexíveis enterrados, permitindo o entendimento do fenômeno do arqueamento do solo.

Originalmente a caixa de reação tinha dimensões

- Largura interna atual: 705 mm
- Comprimento interno: 1000 mm
- Altura total 550 mm
- Altura útil: 500 mm
- Volume útil 0,3525 m^3

As dimensões atuais da caixa de reação são as seguintes:

- Largura interna atual: 608 mm
- Comprimento interno: 1000 mm
- Altura total 550 mm
- Altura útil: 500 mm
- Volume útil 0,3040 m^3

A figura 3.1 mostra um corte na seção transversal central da caixa de reação

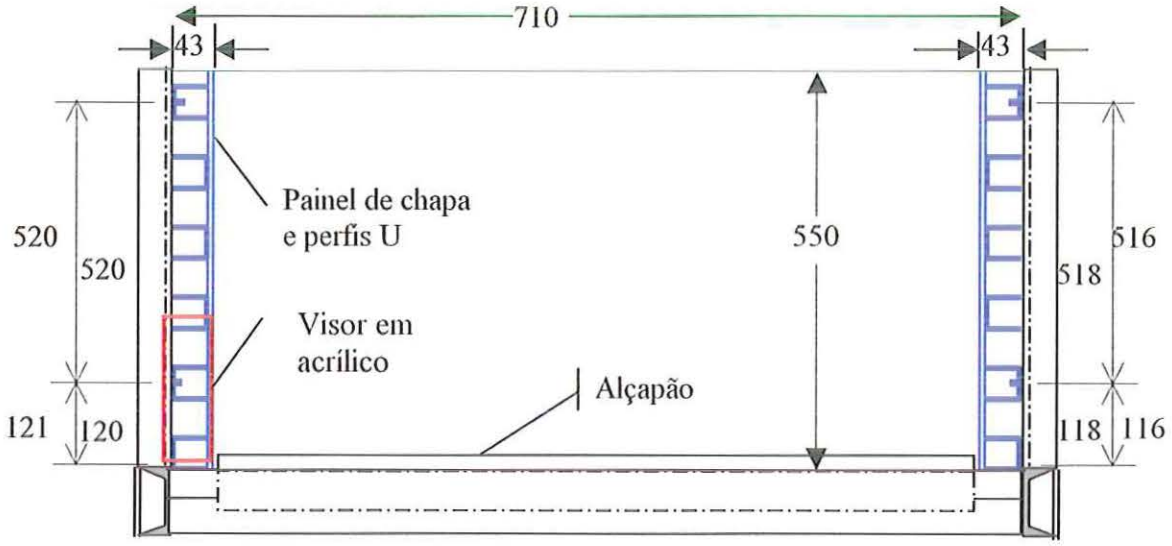


Fig. 3.1 – Vista em corte da caixa de reação, com indicação das alterações estruturais realizadas.

com indicações das principais modificações estruturais.

- Dois painéis internos lisos instalados nas laterais maiores, medindo 1000 x 600 mm.
- Introdução de perfis metálicos longitudinais em "U" para ajustar e dar apoio aos novos painéis laterais.
- Novo visor de acrílico.
- Nova furação do fundo da caixa.
- Introdução de calços nos furos existentes de modo a permitir que se instalem as novas células de carga com dimensões reduzidas.
- Novas colunas necessárias para suportar os trilhos do carro de aplicação de areia.
- Modificação do sistema de fixação do teto.

As modificações da caixa de reação visavam principalmente minimizar o efeito do atrito do solo sobre as paredes contíguas que por sua vez poderiam interferir nas tensões e nos dados registrados. Para tingir este objetivo foi necessário eliminar o ressalto existente, provocado pela projeção interna do visor de acrílico e de diversos furos existente nas paredes laterais, que tinham o objetivo de permitir um ajuste do teto em várias posições intermediárias. Com a introdução dos novos painéis laterais, posicionados internamente e de um novo visor acrílico, conseguiu-se uma superfície lisa como desejado. Também se decidiu que não mais seriam feitos os ajustes das posições intermediárias nas posições do teto da caixa de reação.

3.3 O alçapão

A caixa de reação é dotada um alçapão, composto de dois dispositivos de avanço e um jogo de barras prismática, superior e inferior. O movimento relativo entre as barras é obtido através de um jogo de cunhas complementares acionadas por parafusos com alavancas.

- Barra prismática superior: é montada dentro de um quadro rígido, que serve como guia durante a execução dos movimentos ascendente e descendente, contra o solo, que está contido no interior da caixa de reação. A barra superior é capaz de produzir movimentos relativos

entre o prisma de solo interno e os prismas de solo adjacentes externos, induzindo a um arqueamento de solo positivo ou negativo, similar ao que se verifica durante a instalação de tubulações e durante toda sua vida útil.

Fig. 3.2 – Conjunto de barras prismáticas da caixa de reação.

- Barra prismática inferior: pertence ao sistema motor. Ao receber os movimentos horizontais, produzidos pelos parafusos de acionamento, transmite ao alçapão sob a forma de movimentos verticais. Ao ser movido da esquerda para a direita, pelo parafuso de acionamento, conforme indicado na figura 3.2, o conjunto de cunhas, construída de forma complementar para ambos as barras, transforma o movimento horizontal da barra motora em movimento vertical do alçapão.

Sendo dotado de dois conjuntos de parafusos de acionamento, frontal e traseiro, foram introduzidos dois novos anéis divisores com sistema de indicação de avanço, sendo um para cada conjunto. Cada anel tem 100 divisões.

Sobre o prolongamento de cada parafuso de acionamento foi instalado um cilindro guia passante, com uma haste, que tem a finalidade de fazer o apontamento dos deslocamentos do alçapão.

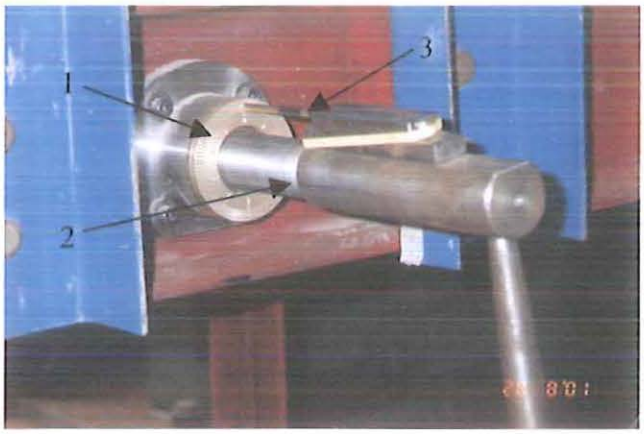


Fig. 3.3 – Novo anel divisor com dispositivo de indicação.

1. Dial com 100 divisões.
2. Parafuso de acionamento.
3. Apontador.

3.3.1 Aferição das medidas de deslocamento vertical do alçapão.

A aferição das medidas de deslocamento vertical do alçapão foi realizada com auxílio de um relógio comparador com base magnética, marca Mitutoyo referencia 3058, com a menor divisão para leitura de 0,01mm. O relógio comparador possui uma haste de altura ajustável, que permite zerar, aferir e relacionar o movimento vertical acedente e descente do alçapão, instalado no interior da caixa de reação, com o movimento de um parafuso de acionamento. A tabela 3.1 mostra o resultado das medições realizadas:

Tabela 3.1 – Correlação das medidas de deslocamento vertical do alçapão com o número de divisões do dial.

N°. de divisões do anel	Avanço do prisma $x10^{-2}$mm
0	94,5
20	90,0
30	85,3
40	80,9
50	75,8
60	70,5
80	59,7
100	50,0
200	100,0
Resolução: 1 divisão	0,005 mm

As medições foram realizadas exatamente sobre a célula de carga 01, que ocupa a posição central do prisma de medição, registrando tanto movimentos para cima e para baixo. A precisão teórica e a precisão medida, do sistema de acionamento completo são de ±0,005 mm , devido a uma folga existente entre o dispositivo apontador e o disco divisor.

Vantagens e desvantagens do sistema de alçapão adotado

De maneira geral podemos citar as principais vantagens do sistema de alçapão :

- Por ser um sistema de "máquinas simples" é relativamente fácil de executar, rústico e de baixo custo.

- É um sistema cinemático robusto e até certo ponto coerente com a severidade do trabalho a ser executado.
- Permite o acoplamento do LVDT e a vantagem de poder integrá-lo ao sistema de aquisição de dados.

Como desvantagem podemos citar:

- Ao executar o movimento de subida, o alçapão é movido pela barra inferior que força o alçapão a se mover contra o solo, enquanto que o movimento de descida é produzido pelo afastamento da barra inferior deixando que o alçapão se movimente livremente. Este movimento é freqüentemente interrompido.
- ser montado dentro de um quadro metálico, com algumas folgas, necessárias ao funcionamento do mecanismo escolhido, porém indesejáveis. Melhor explicando, as laterais maiores do alçapão e as laterais maiores do quadro que lhe serve de guia, possui uma falta de paralelismo. A falta de paralelismo cria folgas que permitem a entrada de partículas de solo, que por sua vez acabam interrompendo o movimento descendente do alçapão.
- Este fato exige um cuidado constante de realizar a limpeza cuidadosa, removendo as partículas das folgas entre batente e alçapão e também o uso de um lubrificante seco, como grafite por exemplo, para minimizar os efeitos do atrito.
-

3.4 O LVDT

Com o intuito de automatizar o obter uma maior precisão e segurança nas leituras e operação da caixa de reação durante a realização dos ensaios, foi introduzido um LVDT. O novo instrumento permite a automação da leitura dos movimentos do prisma indutor, registrando

Fig. 3.4 – Posicionamento do LVDT sob o alçapão.

diretamente no sistema de aquisição de dados.

A calibração do LVDT foi realizada com auxilio de um relógio comparador com base magnética, marca Mitutoyo referencia 3058, com a menor divisão para leitura de 0,01mm, fixado sobre a posição da célula central.

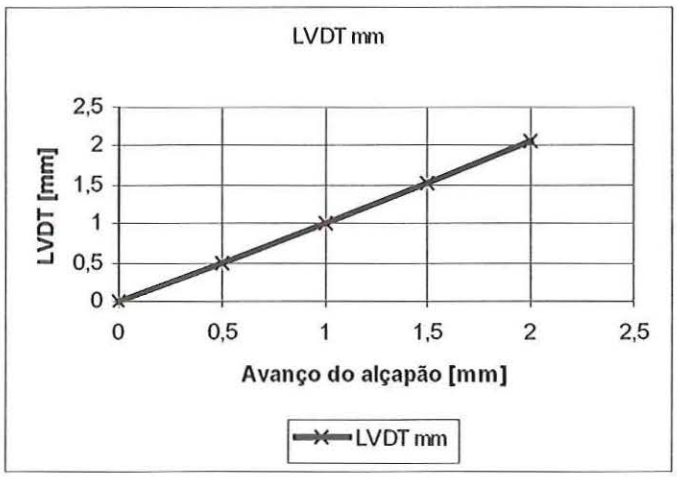


Fig. 3.5 – Gráfico de calibração do LVDT

O gráfico da figura 3.5 mostra a curva de calibração do LVDT.

A vantagem em poder utilizar o LVDT combinado com o sistema mecânico de indicação do avanço do alçapão é poder comparar os valores dos avanços registrados entre os dois sistemas de medição e com isto identificar se houve, ou não, algum travamento involuntário do alçapão. A precisão obtida nos registros do LVDT foi de 0,05mm.

3.5 Células de carga

As células de carga utilizadas são do tipo células de tensão total baseadas em estensômetros, tem por finalidade captar as tensões verticais de solo, verificadas no interior da caixa de reação e transmiti-las ao sistema de aquisição de dados, para serem registradas. Foram instaladas três células de carga no plano coincidente com o fundo da caixa de reação, sendo:

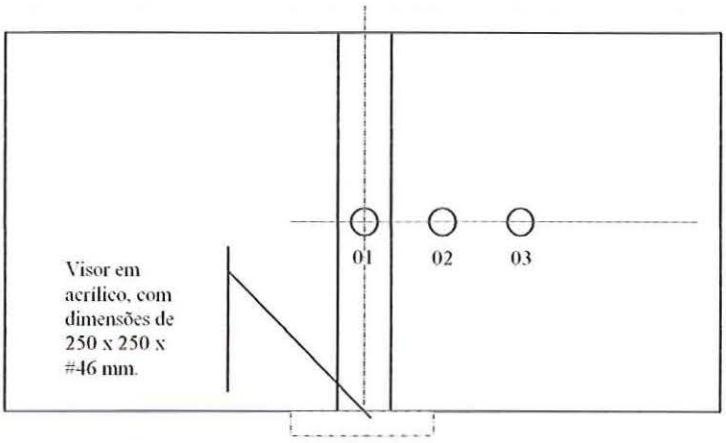


Fig. 3.6 – Disposição das células de carga no fundo da caixa de reação.

- Uma célula no centro da caixa, onde se localiza o prisma móvel, que simula a deflexão de um tubo, permitindo avaliar o alívio das tensões devido ao arqueamento do solo. Esta célula de carga está identificada como sendo a Nº 01.
- Outra célula na lateral central, próxima ao prisma móvel, com objetivo de obter indicações das tensões verticais devido ao arqueamento do solo. Esta célula está identificada como sendo a Nº 02.
- Uma terceira célula ficou localizada na lateral externa em relação ao prisma central, e tem o objetivo de também obter indicações da variação das tensões verticais, provocadas pelo arqueamento do tubo. Neste caso, objetiva-se obter indicações da extensão da variação das tensões verticais em função do afastamento do prisma central. Esta célula será identificada como a № 03.
- Duas outras células de carga foram instaladas na região central da caixa, porém posicionadas em um plano vertical em cotas distintas, para registrar a variação das tensões verticais de solo, durante a realização dos experimentos. As cotas de posicionamento das duas células serão posicionadas de acordo com a conveniência de cada ensaio. As duas células receberão a designação de célula 1A e 1B, respectivamente.

A ligação das células de carga ao cabo de extensão e aos conectores de 9 pinos, para entrada no sistema de aquisição de dados, segue o esquema de ligação da figura 3.6 e o quadro de correspondência de cores apresentado na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Ligação das células de carga e correspondência de cores entre os cabos da célula e extensão.

Pinos	Cabo da célula	Cabo da extensão
5	Vermelho	Vermelho
2	Verde	Laranja claro
7	Preto	Marrom
9	Shield	Shield
4	Branco	Amarelo

As células de carga também tiveram necessidade de serem adaptadas para a instalação no fundo da caixa de reação. Por ser uma caixa já usada, as dimensões dos alojamentos das células de carga eram maiores que o diâmetro das novas células. A adaptação foi feita utilizando-se as carcaças de células antigas danificadas e um tarugo de alumínio usinado.

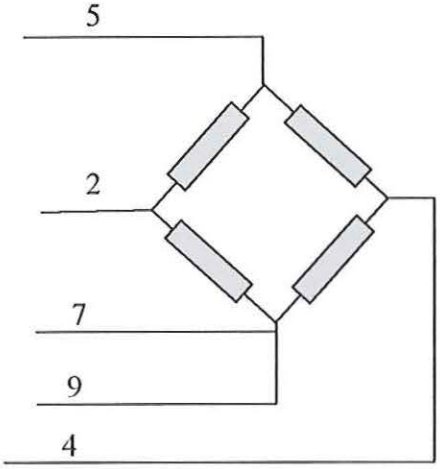


Fig. 3.7 – Esquema de ligação para as células de carga.

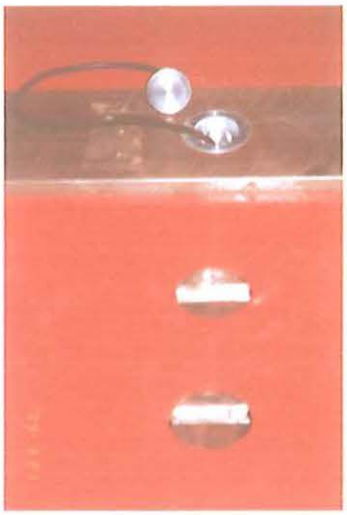


Fig 3.8 – Adaptação das células de carga.

3.6 Calibração dos instrumentos

A confiabilidade dos dados registrados depende diretamente do desempenho das células de carga, por isto foi dedicado um bom tempo da pesquisa na calibração das mesmas.

Para obter uma resposta mais realista da leitura das tensões aplicadas, decidiu-se por calibrar os instrumentos envolvidos pela mesma areia que foi utilizada nos ensaios. Na primeira tentativa de calibração foi utilizada uma cobertura de areia de espessura igual a 50 mm, posteriormente foi alterado para 30mm e finalmente para somente 5 mm.

Para que pudesse ser executada a calibração a contento foi necessária a construção de um dispositivo de calibração que consiste de um seguimento de tubo de PVC marrom de diâmetro 110 mm, tendo ambas extremidades fechadas com uma borracha bastante flexível e resistente. A vedação foi feita uma cola a base de silicone e na fixação foi aplicado uma braçadeira . Para confinar o solo, foi cortado

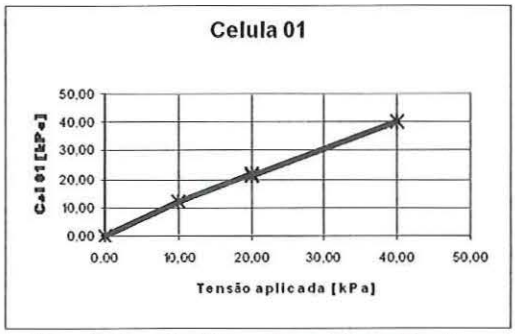


Fig. 3.9 – Gráfico de calibração da célula 01.

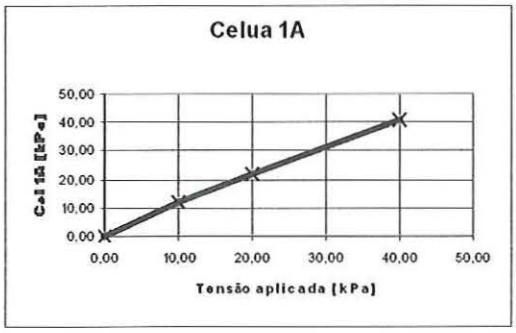


Fig. 3.10 – Gráfico de calibração da célula 1A.

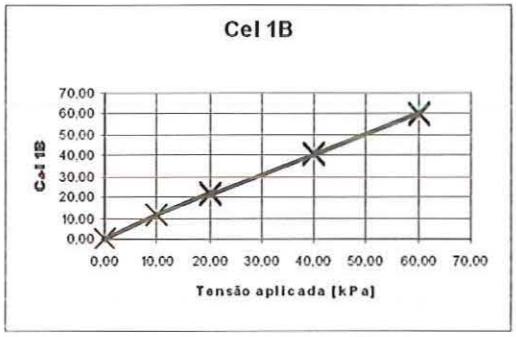


Fig. 3.11 – Gráfico de calibração da célula 1B.

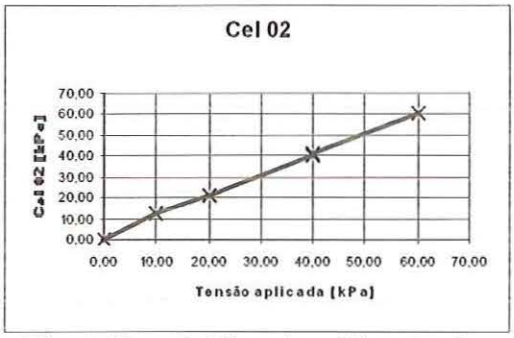


Fig. 3.12 – Gráfico de calibração da célula 02.

um cilindro de R-PVC Dn 150 mm. O cilindro contendo a célula de carga, a ser calibrada, é levado a uma gaiola de carga onde o cilindro de calibração é montado.

Deve-se ter o cuidado de deixar uma camada de solo de 5mm sobre a célula de carga, antes de fechar a gaiola e iniciar a aplicação da carga. A cada ciclo de aplicação de carga o arranjo deve ser refeito para que as características se mantenham. A aplicação da carga é feita com ar comprimido, que a transmite imediatamente para o solo.

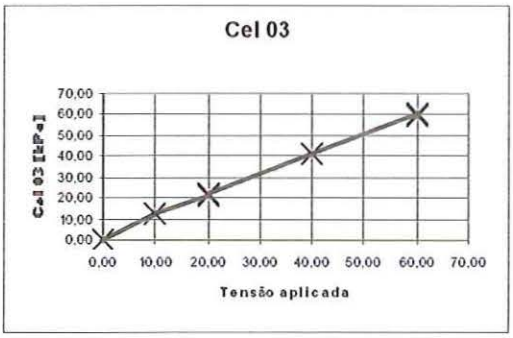


Fig. 3.13 – Gráfico de calibração da célula 03

A calibração da célula é feita com o auxílio do sistema de aquisição de dados, variando o valor da constante até que os valores de carga aplicada e registrada se igualem. O gráfico traçado deve ser uma reta.

3.7 Sistema Win5100

O sistema de aquisição de dados utilizado nesta pesquisa foi o modelo scâner Win5100 provido de 20 canais para aquisição de dados com entrada de sinais analógicos e digitalização dos dados e gravação direta num computador acoplado ao mesmo.

O Gabinete do sistema win 5100 tem capacidade para receber até três scâners paralelos, totalizando 60 canais. Entretanto no sistema atual trabalhamos apenas com dois scâners e um total de 40 canais.

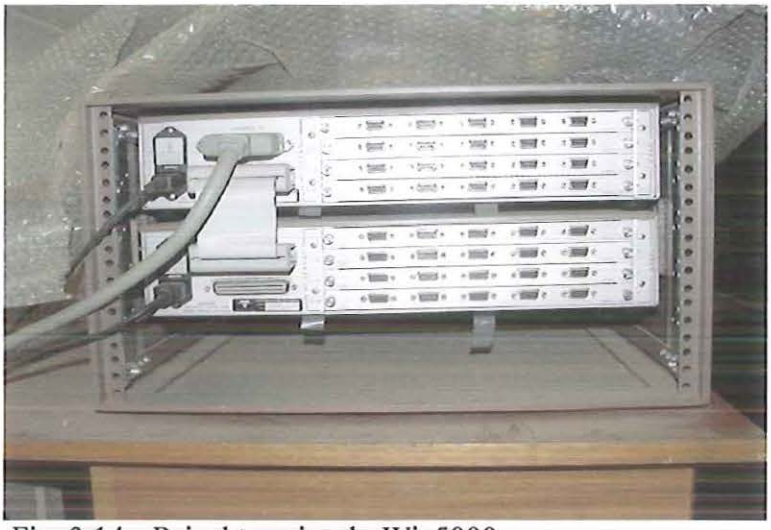


Fig. 3.14 - Painel traseiro do Win5000

O Scâner superior trabalha com quatro placas modelo 5110 de entrada de sinais analógicos oriundos de células de tensão total baseadas em strain gauges.

O Scâner inferior está dividido em duas partes. As duas placas superiores, modelo 5120, permitem a leitura de sinais analógicos baseados em instrumentos termocondutores enquanto que as duas placas inferiores, modelo 5140, admitem sinais analógicos oriundos de instrumentos baseados em LVDT's.

3.7.1 Entrada das conexões

As conexões de entrada no modelo 5110, que corresponde ao scâner superior, são feitas através das placas de entrada para medição das tensões através de conectores de 9 pinos localizados no painel traseiro.

Como pode ser observado na foto ao lado, cada placa, do scâner, tem capacidade de receber cinco sinais de entrada. São fornecidos cinco conectores de entrada, de 9 pinos, para cada placa. A disposição dos pinos de sinais de entradas e suas funções são mostradas no esquema e na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Ligação das células de carga e correspondência de cores entre os cabos da célula e extensão.

Pinos	Função	Cabo da célula	Cabo da extensão
2	Sinal S+	Verde	Laranja claro
4	Sinal S-	Branco	Amarelo
5	Excitação P+	Vermelho	Vermelho
7	Excitação P-	Preto	Marrom
9	Terra [Proteção]	Shielding	Shielding

O caber 5110 pode trabalhar com extensômetros a partir das resistências de 120Ω, 350Ω e 1000Ωb para um quarto de ponte. Para selecionar a resistência desejada para o terminal D [Dummy], a placa 5110 deve ser removida do scaner.

Localiza-se o jumper associado com o canal para ser alterado e recoloca-se o jumper na posição desejada [120, 350 ou 1000]. Volta-se a placa ao lugar de origem.

Para reduzir ruídos e proteger a integridade dos sinais das pontes de descargas eletrostáticas [ESD] e de ruídos de radio freqüência [RF], deve ser feito à conexão com o Shield [terra]. O fio terra deve ser conectado com o pino de número nove do conector de entrada. A ponte do extensômetro externa também deve ser aterrada. Esta proteção é feita conectando o fio terra.

A placa modelo 5110 contém resistores de calibração e chaves seletoras para implementar várias calibrações configuradas em ponte dupla. A troca entre as posições das chaves A e B é somente controlável através do programa. Quatro resistores de calibração são fornecidos em cada canal do sistema 5110.

Tabela 3.4 – Resistores de calibração fornecidos para cada canal – Sistema 5110

Resistores	Range
R20; R45; R70; R90; R120.	49.5 KΩ ±0.1%; 10 000 με para 1000 Ω
R21; R46; R71; R96; R121	5940Ω ±0.1%; 10 000 με para 120 Ω
R22; R47; R72; R97; R122	17 325Ω ±0.1%; 10 000 με para 350 Ω
R23; R48; 473; R98; R123	49.5 kΩ ±0.1%; 10 000 με para 1000 Ω

3.8 Camada Flexível

A camada flexível também chamada de camada indutora é montada com palha de arroz, figura 3.15, por ser relativamente fácil de encontrar em todo território nacional e ter um baixo custo.

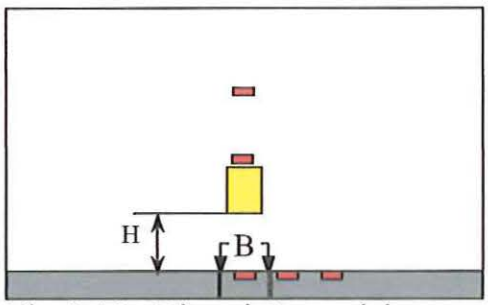


Fig. 3.15 – Disposição geral da caixa de reação.

A principal função da camada flexível é a de induzir o arqueamento do solo que se encontra sobre o tubo e desta forma transferir as tensões do prisma interno onde foi inserida para os prismas laterais externos do solo.

A variação volumétrica do prisma do solo alivia tanto as tensões verticais, atuantes sobre a coroa do tubo, como também reduz as tensões horizontais. Esta característica intrínseca do material selecionado é capaz de produzir um rearranjo bastante eficaz das tensões do solo, afastando-as da coroa do tubo. Aparentemente as tensões são dissipadas além da distância inicialmente prevista de $2B$'s.

A diferença existente, de maneira comparativa, entre o arqueamento real produzido pela deformação de um tubo com o arqueamento produzido pela camada flexível, reside no fato de que um tubo ao se deformar verticalmente no sentido de descendente produz o arqueamento vertical do solo, aliviando as tensões verticais que agem sobre sua coroa e transferindo-as para o prisma lateral. Enquanto isto seu diâmetro horizontal sofre um aumento se deformando contra o solo e encontrando a oposição da reação do solo, mobilizando assim as tensões passivas.

Já com a camada flexível ocorrem tanto deformações com reduções das dimensões verticais como também das dimensões horizontais, aliviando assim todas as tensões ao seu redor, "afastando" ou melhor, dissipando as tensões verticais e horizontais da região mais próxima do tubo para uma região do solo mais afastada deste.

A posição escolhida para a conformação da camada flexível sobre o tubo ou mais afastada verticalmente, com uma distância de um diâmetro, depende da aplicação a que o tubo se destina.

Em sistemas de recalque a possibilidade de ocorrência de transitórios hidráulicos pode ser um dos principais motivos para se escolher uma posição da

camada flexível com uma cota de um diâmetro acima da coroa do tubo. Entretanto outros fatores devem ser considerados pelo projetista como, por exemplo, o tipo de união do tubo. Um tubo com sistema de União Elástica [J.E.] ou simplesmente Ponta-Bolsa-Anel [PBA] exigirá do solo um valor mínimo de atrito, função esta das suas condições de confinamento, para manter o tubo unido alinhado e fixo, sob pena de certas pressões serem capazes de provocar vazamentos.

A travessia de zonas alagadiças perenes, cíclicas ou mesmo ocasionais também devem ser consideradas na escolha da posição da camada flexível em relação à coroa do tubo. Neste caso a possibilidade de que ocorram flutuações, principalmente em condutos coletores que operam com meia seção e fluxos variáveis, exigem uma distância mínima de um diâmetro entre a base inferior da camada flexível e a coroa do tubo.

Os ensaios realizados foram concebidos de maneira a permitir tomar medidas dos valores das tensões de solo com e sem a presença da camada flexível, e relacioná-lo com a largura do alçapão ou diâmetro do tubo. Foram realizados nove ensaios, divididos em duas séries de quatro e mais um ensaio de referência.

O grupo de ensaios da "série A" é composto basicamente por todos os ensaios onde as devidas camadas flexíveis foram montadas diretamente sobre o fundo da caixa de reação, mais precisamente no eixo central, coincidente com a posição da célula de carga número 01 sendo, portanto sua posição relativa *H/B* nula.

A segunda série de ensaios denominada "série B" é composta basicamente por todos os ensaios similares aos da série A, porém com as camadas flexíveis montadas sobre uma camada de areia a 10 cm acima do fundo da caixa de reação.

Para que se pudesse instalar uma camada flexível com as dimensões controladas, foram desenvolvidos moldes metálicos que depois de armados fora da caixa de reação, permitisse a sua instalação no solo do interior da caixa de reação e a posterior remoção dos moldes. A figura 3.16 ilustra a montagem do molde fora da caixa de reação.

Fig. 3.16 – Montagem da camada flexível fora da caixa de reação.

Na seqüência observa-se a figura 3.17 ilustrando o momento da instalação da camada flexível dentro da caixa de reação. O molde metálico, montado com palha e revestido por um papel de poliéster, é levado para o interior da caixa de reação e preparado para realização de um ensaio da série A.

Fig. 3.17 – Montagem da camada flexível dentro da caixa de reação.

Depois de ajustar a posição da camada flexível na caixa de reação é dado andamento na seqüência e lançado a primeira camada de areia, até que a altura da camada de areia se equipare com a altura da camada flexível. A figura 3.18 mostra o ponto onde a camada de areia se equipara a altura da camada flexível e as partes metálicas do molde já estão parcialmente removidas, liberando a camada flexível para que possa trabalhar livremente. O papel de poliéster foi mantido para que a areia e a palha não se misturassem. Caso isto ocorresse, provavelmente haveria um prejuízo de desempenho da camada flexível. O aspecto externo da camada flexível vista a partir do visor de acrílico esta ilustrada na figura 3.19.

Fig. 3.18 – Montagem da camada flexível – remoção das partes metálicas.

Fig. 3.19 – Caixa de reação – visor de acrílico.

3.9 Sistema de lubrificação das paredes da caixa de reação

O atrito entre o solo e as paredes internas da caixa de reação foi observado durante os primeiros ensaios. A interferência do atrito na leitura da célula de carga mais externa foi tão intenso que a mesma deixou de registrar as alterações das tensões, verificadas no solo durante os ensaios.

Para se evitar os efeitos indesejáveis do atrito entre o solo e as paredes laterais da caixa de reação, introduziu-se um sistema de lubrificação composta de dois filmes plásticos e entre eles aplicado uma graxa lubrificante. O revestimento e a lubrificação feita deste modo permitiram que a célula de carga externa voltasse a registrar as alterações de tensões que ocorrem no solo durante a realização dos ensaios.

O lubrificante utilizado foi selecionado com base na compatibilidade com o filme plástico utilizado. A graxa escolhida foi a da marca Gianex por ser de origem vegetal e não conter solvente nem tampouco atacar o material do filme plástico utilizado. Entretanto observou-se que esta graxa separava o óleo do sabão quando submetida a uma pressão constante, o que prejudicava a eficiência do sistema idealizado, além de exigir uma nova aplicação a cada ensaio. Acredita-se que poderá ter pelo menos duas outras alternativas, a serem analisadas, para utilizar como lubrificantes. Por exemplo, as graxas de vaselina e a base de silicone.

O filme plástico utilizado foi o de PVC mesmo empregado na produção de sacos plásticos para embalagens. A escolha deste material inicialmente se deu em função de sua boa resistência, e por permitir a realização de dois ou três ensaios sem que fosse necessária sua substituição. O trabalho do filme plástico tem se mostrado de grande importância na redução do atrito entre o solo e as paredes laterais da caixa. Tanto quanto possível este filme deve acompanhar os movimentos relativos do solo sem que cause interferência nos mesmos.

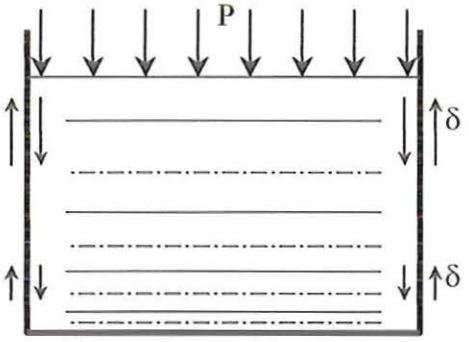


Fig. 3.20 – Caixa de reação sem a camada flexível.

Sem a camada flexível, o solo no interior da caixa de reação ao ser carregado,

tem uma tendência de desenvolver um gradiente de deformação crescente a partir do fundo da caixa em direção a superfície do solo. Melhor explicando, o solo se deforma mais na sua superfície e menos no fundo da caixa. A figura 3.20 ilustra esquematicamente o conceito de deformação do solo sem a trincheira indutora.

Ao ser introduzido uma camada mais flexível que o solo que se encontra originalmente no interior da caixa de reação ocorre uma modificação no estado de tensões. Devido à capacidade de deformação da camada flexível, ocorre uma mobilização das tensões cisalhantes devido a uma maior deformação do prisma interno, aliviando a pressão vertical atuante, transferindo as cargas para os prismas externos. Observa-se agora uma inversão na condição original de deformação do solo, com duas regiões distintas, figura 3.21:

- Prismas externos: é a região que acompanha as deformações originais do solo, sendo pouco influenciado pela camada flexível,
- Prisma interno: é a região, desenvolvida pela presença da camada indutora, que desenvolve um gradiente de deformação agora decrescente, sendo a maior deformação verificada imediatamente sobre a camada flexível e diminuindo sua intensidade ao se dirigir para a superfície do solo. O prisma interno se deforma mais que os prismas externos, solicitando mais o filme plástico, exigindo que este acompanhe as deformações do solo.

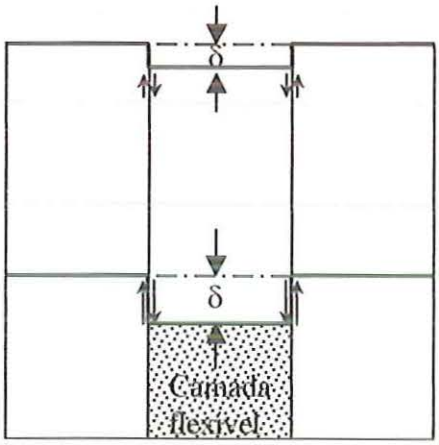


Fig. 3.21 – Caixa de reação com camada flexível.

Do comportamento descrito para o solo, observa-se que o filme que reveste a superfície interna da caixa de reação deve ter uma boa capacidade de se deformar e boas propriedades antiatrito para que cause a menor interferência possível nas tensões que se desenvolvem no solo bem como a menor interferência possível no registro e conseqüentemente na analise dos resultados.

Depois de fixado os filmes e aplicar uma camada de lubrificante entre os mesmos, fechando as bordas superiores na caixa é feito a vedação para evitar a penetração de areia entre os dois filmes plásticos, a caixa de reação estava pronta para iniciar o ensaio e a aplicação e compactação da areia através da técnica da chuva de areia.

Concluído a operação de aplicação de areia e o nivelamento da mesma, os filmes de revestimento interno devem ser soltos para que a possam trabalhar livremente e a camada lubrificante tenha um melhor desempenho.

3.10 O solo

O solo inicialmente utilizado nesta pesquisa foi uma areia extraída de rio e comercializada pela Mineração Iporanga.

Com objetivo de determinar o tamanho das partículas foi realizado um ensaio de peneiramento, conforme norma ABNT-MB-32, e traçado a curva de distribuição granulométrica, cujos resultados estão representados na curva granulométrica da figura 3.22.

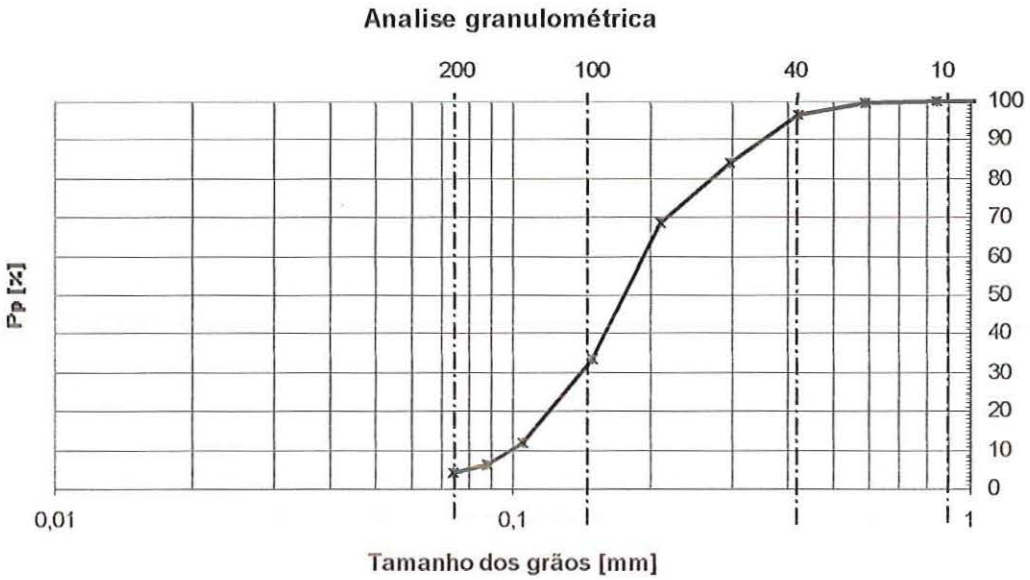


Fig. 3.22 – Curva de distribuição granulométrica

Pode ser observada a predominância de grãos pequenos, com teor de sólidos que passam na peneira 40 de 96,42%, portanto qualificando a areia como fina.

Com base na curva de distribuição granulométrica pode-se calcular o diâmetro efetivo "D_e" e o coeficiente de não uniformidade "C_u".

O diâmetro efetivo do solo é definido como o diâmetro para o qual, apenas 10% da sua massa, tem diâmetro inferior ao diâmetro efetivo.

Da figura 3.22, observa-se que a reta horizontal passando pelo teor de 10% cruza com a curva granulométrica no ponto correspondente ao diâmetro 0,10mm, portanto:

$D_e = 0{,}1mm$

O valor de D_e é importante pois representa a parte fina do solo, portanto a parcela de solo que mais interfere no seu comportamento.

Entretanto um outro dado igualmente importante é a massa de sólidos que passa pela peneira 200 e que ficam retidos no prato. Este teor é de 4,12%, que constitui a parcela correspondente ao silte e a argila.

O coeficiente de não uniformidade transmite a idéia de quanto à curva granulométrica esta inclinada, sendo definida como:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0{,}18}{0{,}10} = 1{,}8$$

Conceitualmente esta areia tem um alto grau de uniformidade, pois o valor de C_u aproxima-se da unidade.

Foram realizados ensaios para determinação da densidade relativa, segundo a norma ABNT MB-3324 e MB-3388, apresentando os seguintes resultados:

- $\gamma_{s,máx} = 1{,}72g/cm^3$
- $\gamma_{s,mín} = 1{,}42g/cm^3$
- Segundo a ABNT NBR 6508 de 1980 $\gamma_s = 2{,}70g/cm_3$

Para determinação do teor de umidade foram feitas três coletas de amostras durante a fase de ensaios e realizado a secagem com auxilio de um aparelho de micro-ondas, com tomada de tempos de 2 min em 2 min até que fosse observada a constância de massa. Neste ponto é interrompido o processo de secagem e aguarda-se que a amostra resfrie para então tomar seu peso. A umidade assim determinada não ultrapassou ao teor máximo de 1%.

3.11 Chuva de areia

Para que se consiga as condições necessárias de adensamento decidiu-se pela utilização do método de aplicação da chuva de areia.

Fig. 3.23 – Vista geral da caixa de reação com o carro de areia.

O método de aplicação consiste de se utilizar um carro com capacidade para armazenar cerca de 25 kg de areia, sendo provido de uma abertura em forma de rasgo de abertura constante de modo a permitir uma aplicação uniforme da areia em toda largura sua largura. Entretanto o movimento do carro é feito manualmente, exigindo um cuidadoso controle visual da distribuição da areia ao longo do comprimento da caixa de reação. A aplicação e distribuição da areia são feitas movimentando o carro sobre duas cantoneiras horizontais, que por sua vez são suportadas por quatro colunas fixas nos cantos da caixa de reação, conforme ilustra a figura 3.23. Para limitar o curso do carro e evitar que a areia aplicada ultrapasse os limites da caixa de reação, foram instaladas duas vigas "U", com posições ajustáveis em função da necessidade.

Para se determinar qual é a altura de queda ideal realizou-se ensaios para verificar a eficiência deste método de compactação em função da altura de queda da areia, cujos resultados podem ser observados no gráfico da figura 3.24.

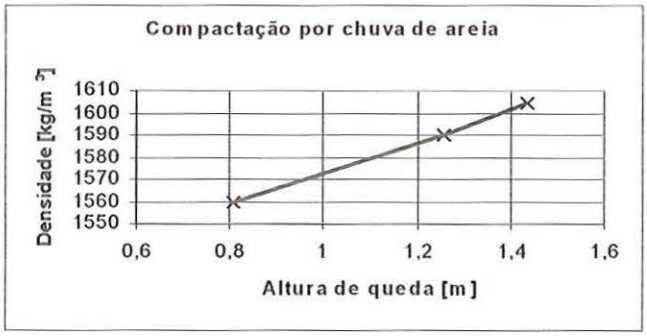


Fig. 3.24 – Gráfico da densidade obtida pela técnica de compactação por chuva de areia.

A compactação da areia obtida por meio deste método depende de vários fatores como:

- Altura de queda,
- Vazão da areia, que por sua vez depende de:
  - Dimensão e forma construtiva da abertura para passagem da areia,
  - Distribuição granulométrica ,
  - Grau de umidade da areia,
  - Altura média ou coluna de areia no interior do carro,
  - Construção geométrica do carro.
- A combinação da altura de queda e da vazão da areia é, portanto, responsável por oferecer uma energia cinética aos grãos de areia de tal modo que ao chocarem com a camada de areia anteriormente depositada produzem um arranjo com um determinado grau de compactação dos grãos.

$$D_R = \frac{\rho_{d,máx} \cdot (\rho_d - \rho_{d,\min})}{\rho_d \cdot (\rho_{d,máx} - \rho_{d,\min})} \tag{3.1}$$

Aplicando a equação 3.1 ao valor obtido no gráfico correspondente a altura de queda máxima de 1,435 m, e considerando os valores de $\rho_{d,max}$ = 1,72 kg/l e $\rho_{d,min}$ = 1,42 kg/l, obtemos um valor para compacidade relativa D_R de 65,87%. Na prática foram utilizados 495 kg de areia para que se completasse o nível da caixa, correspondendo a um volume de 0,3040 m^3, o que representa obter uma massa específica seca ρ_d = 1,612 kg/l, equivalente à compacidade relativa D_R de 68,24%.

Fig. 3.25 – Carro de aplicação de areia – detalhe da abertura de dosagem antiga.

Antes de testar o sistema de adensamento da areia foi

ensaiado os valores de $\rho_{d,mim}$ e $\rho_{d,max}$ conforme norma ASTM D 4253 e D4254 e foram obtidos os valores de 1,42 kg/l e 1,72 kg/l respectivamente.

Para definição das alturas de queda foi necessário fazer uma modificação na abertura do fundo do carro, que se mostrava bastante irregular como ilustra a figura 3.25 além de não ser dotado de nenhum dispositivo que permitisse sua calibração.

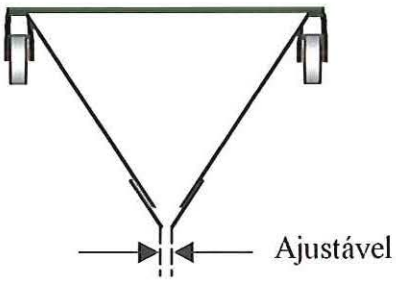


Fig. 3.26 – Carro de aplicação de areia – esquema da nova abertura de dosagem.

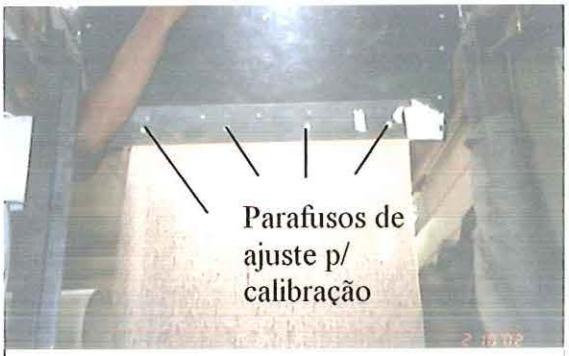


Fig. 3.27 - Carro de aplicação de areia – detalhe do novo sistema de aplicação.

O novo dispositivo idealizado permitiu a dosagem e regularização do fluxo de areia em toda a extensão da abertura inferior, tornando sua aplicação mais homogênea.

A figura 3.26 ilustra a concepção do novo sistema de aplicação, composto por duas chapas de aço planas, com espessura de #1/16 pol, fixadas na base externa inferior do carro. O ajuste da abertura é feito através de quatro parafusos passantes, dispostos ao longo da largura do carro, conforme indicado na figura 3.27. A calibração da abertura do rasgo foi obtida utilizando um ferro chato de #3/16 pol, que funciona como um calibrador para a largura da abertura.

A modificação do sistema de dosagem e aplicação permitiu ainda que se introduzisse um sistema de fechamento e abertura da passagem da areia com uma cantoneira em alumínio, simplificando bastante a operação.

Fig. 3.28 – Aplicação de areia.

Após o abastecimento do carro, com aproximadamente 25 kg de areia seca, é então removido a cantoneira que faz a vedação da abertura do sistema de dosagem e aplicação do carro e inicia-se a aplicação da areia, conforme ilustra a figura 3.28.

O movimento do carro é controlado manualmente, exigindo grande atenção na uniformidade da aplicação e formação da camada de areia. Ao final da aplicação é necessário ajustar manualmente nível da areia no interior da caixa de reação.

Fig. 3.29 – Nível final da areia na caixa de reação.

A regularização do nível da areia na caixa é conseguida com o uso de uma régua que ajudava a distribuir uniformemente a areia na caixa. A verificação do nível foi realizada com o auxilio de uma barra horizontal, apoiada nas bordas da caixa, permitindo que se corresse um gabarito que por sua vez marcava regularmente o solo, conforme indicado na figura 3.29. Os pontos onde o gabarito não tocava o nível da areia na caixa, indicava a falta desta enquanto que o ponto onde o gabarito afundava na areia indica o excesso. Este ciclo de operações se repetia até obter uma superfície bem regularizada. Outro artifício utilizado foi à marcação de níveis na caixa, distribuídos regularmente a cada 10 cm.

Deste modo dispunha-se de dois sistemas que permitia uma boa aferição do nível de solo na caixa de reação.

Capítulo 4

SISTEMATIZAÇÃO E ANALISE DOS DADOS

4.1 Introdução

Este capítulo é dedicado a analise dos dados colhidos durante a execução dos ensaios.

De um modo geral os critérios de análise adotados na interpretação dos dados e em sua discussão são norteados pelos seguintes princípios:

1. Apresentação: Todos os dados colhidos, durante a realização dos ensaios e registrados através do sistema de aquisição de dados, serão apresentados sob a forma de gráficos.
2. A figura 4.1 ilustra a disposição geral dos ensaios realizados, indicando a posição e dimensão da camada flexível para cada série. O ensaio de referência permite colher e avaliar as "tensões de campo livre", isto é sem nenhuma perturbação e posteriormente compará-las as tensões obtidas através dos demais ensaios realizados com a presença de camada de indução.

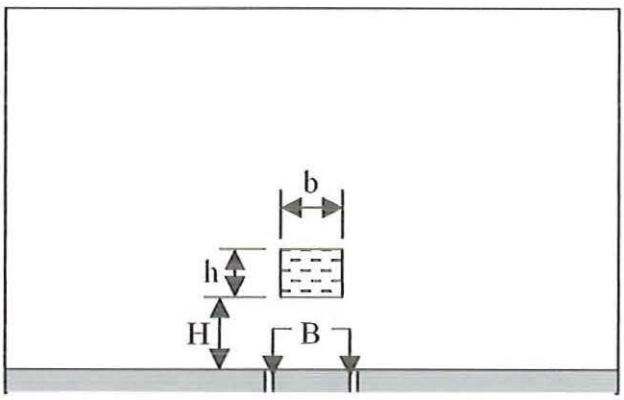


Fig. 4.1: Esquema de referência para ensaios das séries "A" e "B".

a. Os ensaios podem ser agrupados em duas séries distintas, cada qual composta por quatro ensaios, onde a principal diferença entre os mesmos está no posicionamento da camada flexível, em relação ao plano do fundo da caixa de reação.
   i. Série A: Nos ensaios desta série a camada flexível foi montada diretamente sobre a posição central da caixa de reação, ou seja, sobre a célula 01, posicionada imediatamente acima do alçapão.
   ii. Série B: Nesta série a camada flexível foi posicionada em um plano situado a 10 cm acima do fundo da caixa de reação.
   iii. As dimensões adotadas para as camadas flexíveis são iguais tanto para a série A como para a série B.

Tabela 4.1 – Dimensões e posicionamento da camada flexível para as séries "A" e "B".

ENSAIOS	CAMADA FLEXÍVEL		
	h/B	b/B	H/B
De referência	0	0	0
Ensaio 01 – série A	1,0	1,0	0
Ensaio 02 – série A	0,75	0,75	0
Ensaio 03 – série A	0,50	0,50	0
Ensaio 04 – série A	0,30	0,30	0
Ensaio 01 – série B	1,0	1,0	1
Ensaio 02 – série B	0,75	0,75	1
Ensaio 03 – série B	0,50	0,50	1
Ensaio 04 – série B	0,30	0,30	1

3. A análise tem por objetivo focar a atenção nas tensões antes e depois da construção da camada flexível, portanto deve-se considerar somente nos benefícios advindos do uso da mesma. Pode-se entender que os benefícios produzidos pelos movimentos do alçapão não devam ser considerados, pois não constituem um benefício produzido pela camada flexível e sim pelo movimento do alçapão. Deste modo, a fase final dos ensaios, que somente dizem respeito aos movimentos descendentes do alçapão, teve a finalidade de ajudar a entender os efeitos produzidos pela deformação do

tubo no arqueamento do solo, mas efetivamente não traz nenhuma contribuição para esta analise dada a dificuldade de quantificarmos tal deformação.

4. Comparação adimensional direta: A comparação adimensional direta é feita tomando-se por base o ensaio de referência e o primeiro ensaio realizado de cada série. O objetivo de se analisar as tensões registradas em cada um dos ensaios com o ensaio de referência e o primeiro ensaio da sua série é permitir que se tenha uma visão direta dos beneficios produzidos por um tipo específico de instalação e de fazer a adimensionalização dos dados em função das variáveis de interesse, ou seja: "tensões do ensaio com a presença da trincheira flexível/tensões do ensaio de referência sem a presença da camada flexível σ_{vT}/σ_{vR}"; "relação entre as tensões desenvolvidas nas profundidades de instalação vertical das células de carga em relação à dimensão do alçapão Z/B" e por último a "analise das tensões em relação ao afastamento da posição central em relação à largura do alçapão X/B".
5. Previsão teórica: A analise dos valores registrados em cada ensaio foi comparada a valores teóricos com base no cálculo das cargas sobre tubos, utilizando o recurso da fórmula apresentada por MARSTON & ANDERSON, aplicada à condição específica de cada ensaio. Partimos do pressuposto de que a camada flexível é capaz de se deformar o suficiente para mobilizar o arqueamento do solo. Esta análise é apresentada sob a forma de gráfico seguida dos respectivos comentários.
6. Também procurou-se obter relatos sobre ensaios e instalações onde foram aplicadas as técnicas da trincheira induzida. Vala imperfeita ou falsa trincheira são outras denominações atribuídas a esta mesma técnica de instalação.

4.2 Análise dos dados relativo ao ensaio de referência.

O ensaio de referência consiste na montagem da caixa de reação conforme descrito no capítulo 1.3 e 3.8, somente com areia depositada e compactada através da técnica de chuva de areia.

O objetivo do ensaio de referência é permitir a obtenção dos valores das tensões de campo livre por meio de medições realizadas com células de tensão total e registradas com auxilio de um sistema de aquisição de dados. Os valores aqui registrados serão comparados aos valores das tensões de outros ensaios realizados com a inclusão de trincheira de indução observando-se as geometrias e posições definidas previamente.

A disposição geral das células de carga no interior da caixa de reação está indicada na figura 4.2.

As células de carga foram divididas em dois conjuntos:

- O primeiro conjunto formado pelas células 1, 1A e 1B e permite monitorar as tensões desenvolvidas em um plano vertical passando pelo eixo central da caixa de reação.

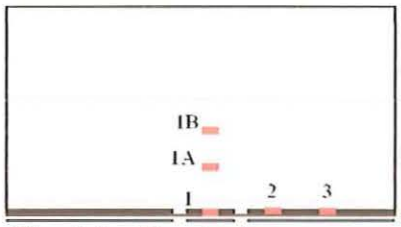


Fig. 4.2 – Ensaio de referência - disposição das células de carga na caixa de reação.

- O segundo conjunto formado pelas células 1,2 e 3 foi distribuído no fundo da caixa, ocupando as posições central e lateral, permite observar o desenvolvimento das tensões neste plano, nas regiões central e adjacente, com olhos nas suas tendência.

Os dois conjuntos de células nos auxiliam a entender melhor o comportamento dos fenômenos que se desenvolvem no solo sem a presença das camadas flexíveis e posteriormente com a presença das mesmas.

4.2.1 Dados do ensaio de referência

Na apresentação dos gráficos foi adotada a seguinte convenção de linhas:

I. ---·---·---·--- Registra os valores lidos pelo:

a. Sistema de aquisição - LVDT.

b. Analise do dados – os valores de γH.

II. ———————— Valores registrados pela célula 1B.

III. —▲—▲—▲— Valores registrados pela célula 1A.

IV. ———————— Indica os valores registrados pela célula da posição 1.

V. ---------- Representam os seguintes dados:

a. Valores registrados pela célula instalada na posição lateral 2 e na análise comparativas entre o ensaio de referência e o ensaio onde foi utilizada a camada de indução.

b. Valores teóricos comparados com valores registrados.

VI. —●—●—●— Valores registrados pela célula de carga localizada na posição lateral 3.

Deste modo todos os gráficos que serão apresentados obedecem a este mesmo critério de linhas, facilitando o relacionamento e entendimento dos mesmos.

No gráfico da figura 4.3, os valores de tensões correspondentes à faixa de nosso interesse estão localizados antes dos valores registrados na ordenada "scan 580". O avanço do alçapão, na verdade foi empregado com a finalidade de ajudar a entender o fenômeno do arqueamento e o mecanismo pelo qual se dá.

A região de interesse, do gráfico em questão, corresponde na prática a fase construtiva e registra a formação de camada por camada, com aumentos progressivos das cargas de solo, obtidas através da aplicação da técnica descrita como cortina de areia.

A seqüência de instalação das células pode ser acompanhada pelo desenvolvimento das tensões no gráfico da figura 4.3:

- As curvas que representam os valores de tensão vertical adjacentes foram registradas pelas células número 01, 02 e 03 instaladas no plano coincidente com o

fundo da caixa e, portanto iniciam sua trajetória a partir da origem e crescem continuamente até o que o enchimento da caixa se complete e a chuva de areia tenha sido finalizada.

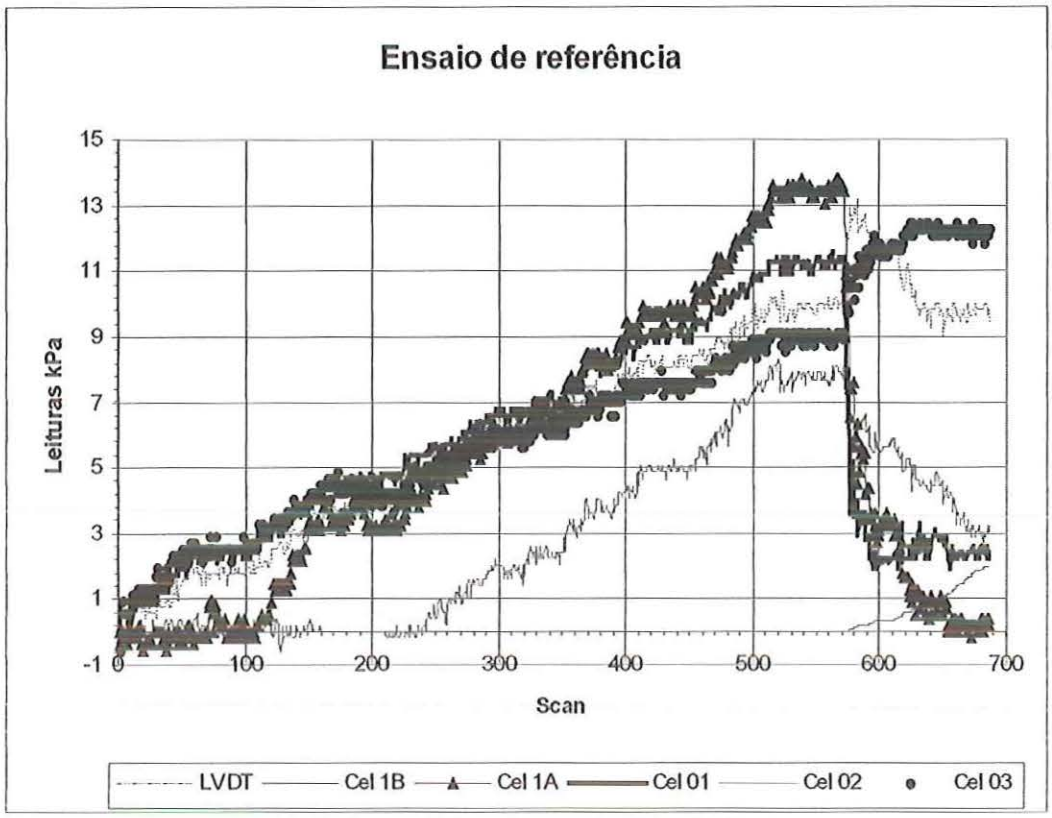


Fig. 4.3 – Gráfico com dados colhidos do ensaio de referência.

As curvas correspondentes às células de números 1B e 1A, foram instaladas a uma altura "*Ha*" de 10cm [*Za*=40cm] e "*Hb*" de 20cm [*Zb*=30cm] a contar do fundo da caixa [ou da superfície do solo] respectivamente. Suas trajetórias seguem registrando valores de tensões nulas até o momento em que efetivamente foram instaladas, correspondendo às posições "scan 110" e "scan 230" respectivamente. A partir deste instante os valores de tensão registrados pelas células 1A e 1B seguem crescendo até que o enchimento da caixa se complete e a chuva de areia tenha sido finalizada, nas proximidades do scan 580.

Um melhor entendimento pode ser obtido através da analise do gráfico adimensional do ensaio.

No gráfico da evolução das tensões do ensaio de referência, apresentado na fig.4.4 é possível observar a formação de cada camada, disposta de 10 em 10 cm, correspondendo a relação H/B =1, 2, 3, 4 e 5.

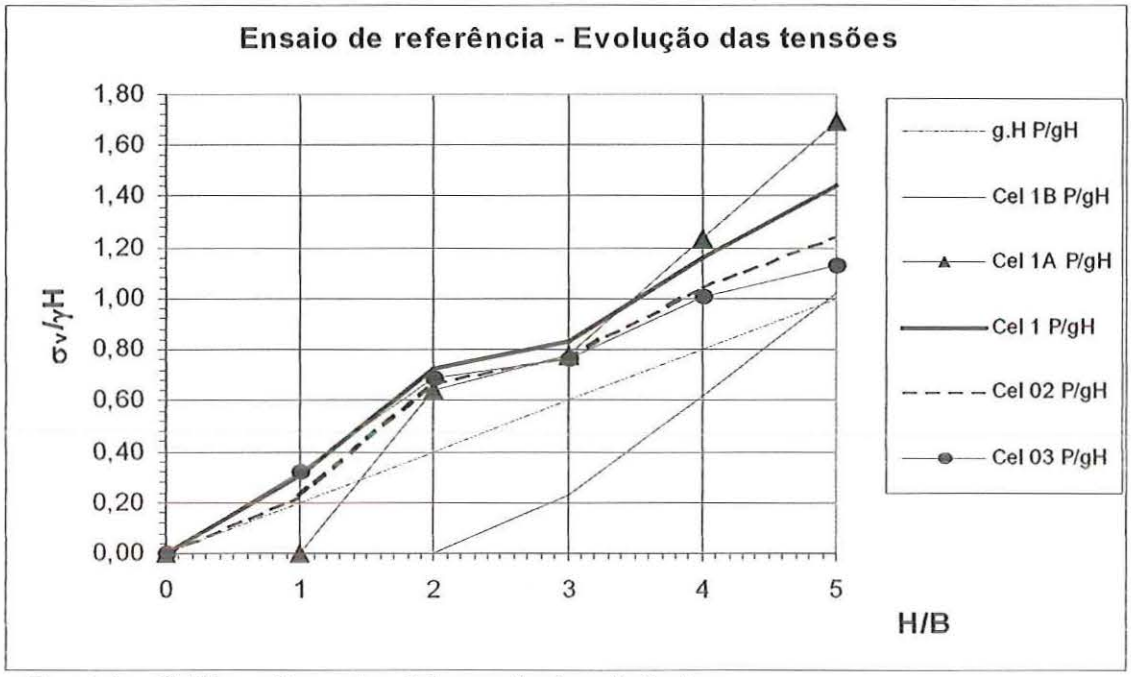


Fig. 4.4 – Gráfico adimensional do ensaio de referência

Deste modo é fácil perceber que o grupo formado pelas células posicionadas no fundo da caixa, cel 01, cel 02 e cel 03, tem o registro das tensões atuantes desde a origem, seguindo sempre crescente até que seja completada a colocação da última camada de areia, sendo que as cel 1A e cel 1B iniciaram os seus registros de dados somente ao serem instaladas nas suas posições, correspondendo a H/B = 1 e H/B = 2, respectivamente.

Neste gráfico representamos as tensões teóricas esperadas de solo, pela curva correspondente a $P/\gamma.H$.

Na posição $H/B = 2$ existe uma distorção da curvas de tensão, que pode ser justificável pelo fato de haver a necessidade de intervenção no ensaio para a inclusão das células de cargas 1A e 1B respectivamente.

Outra tendência interessante é observada nas curvas de tensão, correspondente aos valores registrados pelas células nas posições 02 e 03, que se encontram abaixo das tensões registradas pela célula 01.

É provável que isto possa ser atribuído ao fato de que as células 02 e 03 se encontram afastadas do centro e estão sucessivas e gradualmente posicionadas mais próximas à parede direita da caixa de reação e seus registros acabam sendo afetados pelo efeito do atrito do solo entre, não apenas uma, mas três paredes: anterior, posterior e lateral direita.

4.3 Analise dos ensaios da Série A

4.3.1 Ensaio número 01

O ensaio número um consiste na montagem da caixa de reação com areia, porém com a introdução de uma camada flexível formada basicamente de palha de arroz arrumada em um molde metálico de dimensões 10cm x 10cm correspondente as relações $h/B = 1$ e $b/B = 1$, sendo posicionada sobre o alçapão correspondendo a relação de $H/B = 0$, conforme ilustra a figura 4.5.

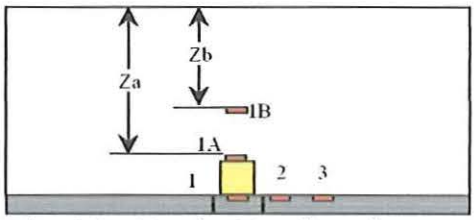


Fig. 4.5 – Ensaio 01 – disposição das células de carga na caixa de reação.

Depois de lançada a primeira camada de areia, com espessura de *1B* correspondente a altura da camada flexível, o molde metálico é então removido, deixando assim a camada flexível livre para poder trabalhar. É então dada seqüência ao procedimento de enchimento da caixa com areia.

Em função da introdução da camada flexível, a célula de carga *1A* foi posicionada logo acima da mesma na profundidade $Za = 39$ cm, com objetivo de registrar as tensões de solo.

A posição da célula *1B* permaneceu na sua posição original $Zb = 30$ cm [vide ensaio de referência].

As posições *Za* e *Zb* representam a distância entre o nível da superfície, ocupado pela areia na caixa de reação, até a posição da célula de carga correspondente *1A* ou *1B*.

4.3.1.1 Dados do ensaio 01

Os dados registrados pelo gráfico apresentados na figura 4.6 referem-se ao resultado do ensaio número 01. O ponto identificado por "scan 478" limita a faixa de dados de nosso interesse.

À direita deste ponto, encontra-se o valor de tensão obtido através do avanço do alçapão e não serão utilizados nessa analise.

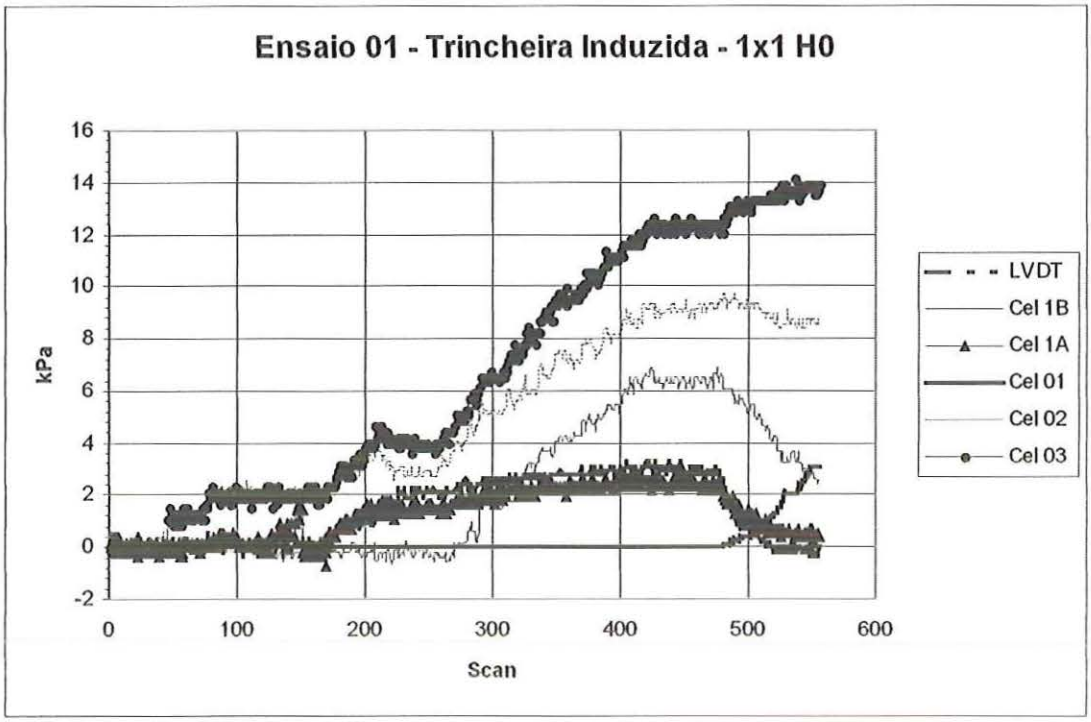


Fig. 4.6 – Ensaio 01 – Registros com a presença da camada flexível h/B=1; b/B=1 e H/B=0

Pela observação da evolução das tensões no gráfico da fig 4.6 pode-se notar as diversas fases construtivas marcadas pelos níveis de tensão que se formam espontaneamente.

Observa-se claramente uma inversão nos níveis de tensão registrados pelas células de carga quando comparados ao ensaio de referência.

A figura 4.7 traz a adimensionalização dos dados do ensaio 01, sendo que o adimensional da abscissa foi obtido em função dos valores das tensões registradas neste ensaio divididos pelos seus respectivos equivalentes valores de tensões registrados no ensaio de referência enquanto que o adimensional dos valores da ordenada foi obtido em função da posição relativa da profundidade dividida pela largura do alçapão (Z/B).

Como os valores de tensão registrados no gráfico da figura 4.6 foram divididos diretamente pelos valores equivalentes, registrados no gráfico da figura 4.3, os valores

resultantes representam a contribuição direta da aplicação da camada flexível, simplificando bastante a analise, pois é uma comparação direta.

a) Célula 01 – Este é o ponto mais importante da analise, pois representa a parcela de tensão que chega diretamente ao tubo ou conduto e, portanto nos dá idéia do benefício auferido pelo uso da camada de indução com a configuração ensaiada. Para esta configuração as tensões relativas são de 0,26 o que significa dizer que houve uma redução de 74% da carga de solo aplicada e que age efetivamente sobre o conduto.

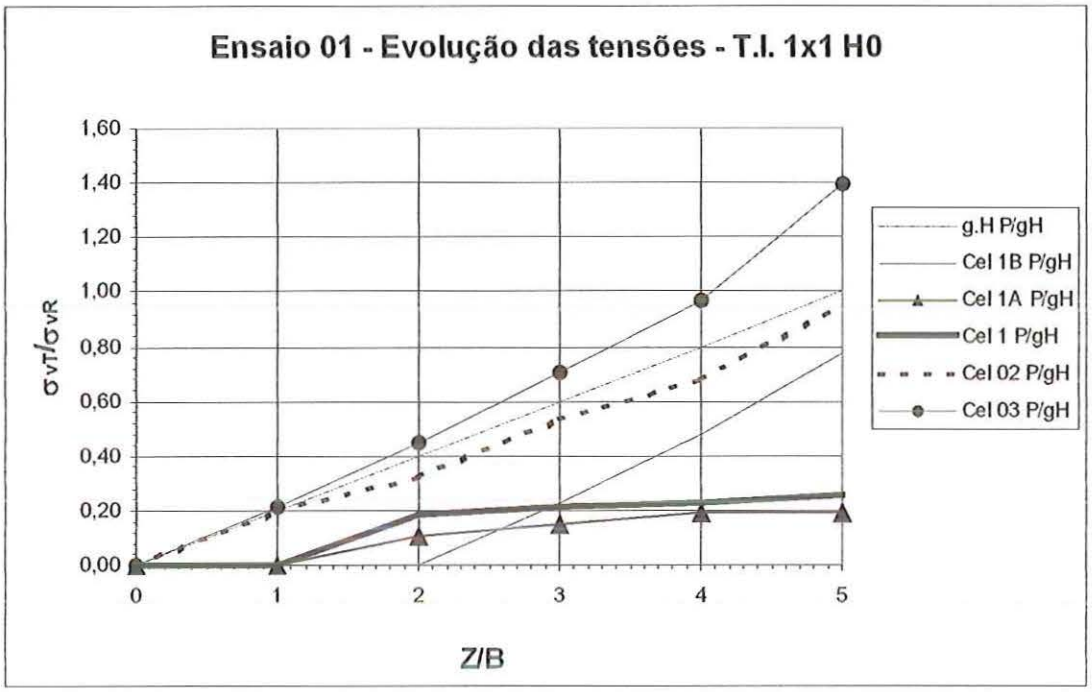


Fig. 4.7 – Ensaio 01 – Adimensionalização dos dados em função de (H/B x σv/γH)

b) Célula 02 – Observa-se que o uso da camada flexível produz um alívio também na sua região adjacente. As tensões sofreram uma pequena redução correspondente de 5%. Diferente dos condutos flexíveis que ao receberem a carga vertical sofrem uma deflexão vertical se "achatando" e aumentando o diâmetro horizontal, a camada de indução sofre uma redução do diâmetro vertical sem aumentar seu diâmetro horizontal promovendo assim uma redução de tensões adjacente. O arqueamento deste modo torna-se bastante eficiente,

expulsando as tensões para um pouco mais longe do podia ser esperado, ao compararmos somente com o efeito de avanço do alçapão, produzido no ensaio de referência.

c) Célula 03 – Efetivamente esta célula é que recebeu a maior parcela das tensões devido ao arqueamento. Observou-se um acréscimo de tensões de 39% em relação às tensões registradas e aplicadas.

d) Célula 1A – O efeito do arqueamento produzido imediatamente sobre a camada de indução também trouxe uma redução dos valores de tensão registrados imediatamente acima da mesma. A relação entre as tensões registradas e aplicadas é de apenas 0,19 significando uma redução de 81% no nível das tensões.

e) Célula 1B – Observa-se na figura 4.7 uma tendência das tensões registradas pela célula de carga a seguir uma trajetória aproximadamente paralela às tensões registradas pela célula 03. A tensão relativa registrada foi de 0,78 significando uma redução de 22% em relação ao ensaio de referência.

A figura 4.8 traz um gráfico com estimativa das tensões sobre o conduto com a utilização da camada de indução com as mesmas dimensões do ensaio 01.

4.3.1.2 Tensões teóricas x tensões registradas

O gráfico Estimativa das tensões devido ao arqueamento, apresentado na figura 4.3.4, foi elaborado com a aplicação da equação (4.1) para cálculo de σ_v.

$$\sigma_v = \frac{B.\gamma}{2.K_a.\tan\phi'}\left\{1 - e^{\left[\frac{-2K_a(\tan\phi')H}{B}\right]}\right\} \tag{4.1}$$

A relação de tensão teórica corresponde aproximadamente a 0,39 relativamente aos valores de tensões aplicadas.

Se comparadas com os valores de tensões efetivamente obtidos no ensaio 01, gráfico apresentado na figura 4.8, notamos que ficou acima do valor registrado 0,26 contra um valor calculado de 0,41. Deste modo pode-se constatar um desvio de 57,7% no valor predito de tensão deste ensaio. Esta comparação demonstra que a aplicação da equação (4.1) na previsão de tensões sobre a tubulação, com utilização de trincheira induzida, fornece resultados bastante conservadores.

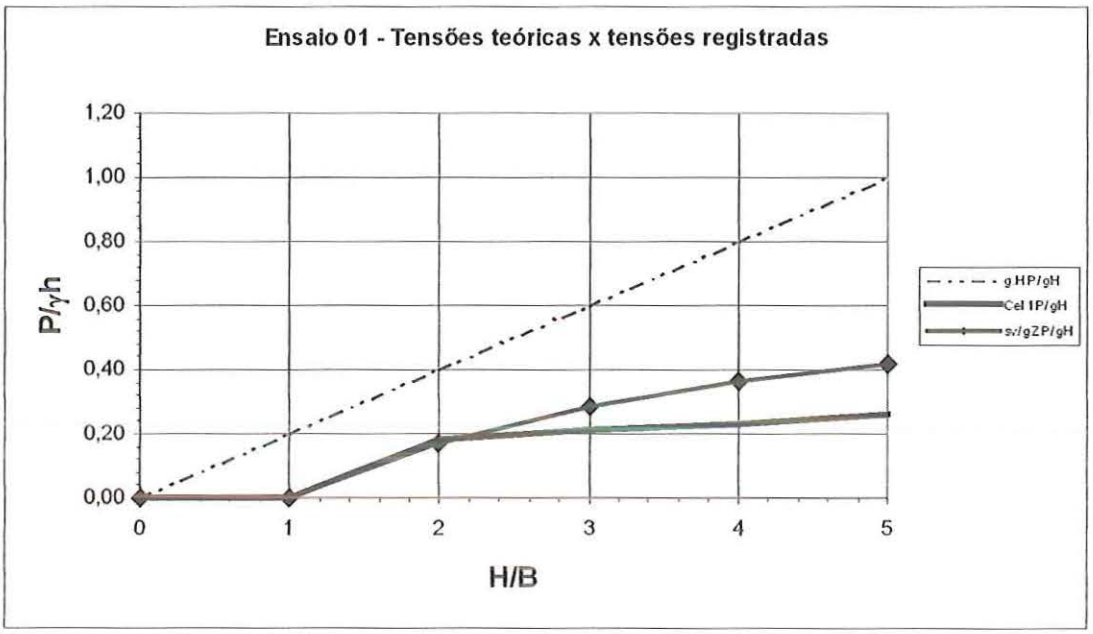


Fig. 4.8 – Gráfico da relação entre as tensões registradas no ensaio 01 e as tensões teóricas.

Uma questão que não chegou a ser avaliada, por estar fora desta proposta de trabalho, é o comportamento da trincheira induzida em longo prazo. É possível que os valores para a tensão teórica, obtida a partir da aplicação da equação (4.1) se aproxime mais dos valores reais.

4.3.2 Ensaio número 02

Semelhante ao ensaio número 01 este consiste na montagem da caixa de reação com areia, porém com a introdução de uma camada com dimensões diferentes da primeira. As novas dimensões adotadas são 7,5cm x 7,5cm correspondente a relações h/B = 0,75 e b/B = 0,75, sendo posicionada diretamente sobre o alçapão com H/B=0, conforme ilustra a figura 4.5.

A célula de carga 1A foi posicionada logo acima da camada flexível, Za = 41,5 cm, enquanto que a posição da célula 1B não sofreu alterações Zb = 30 cm. Lembrando que Za e Zb representam a distancia entre o nível da superfície da areia na caixa de reação até a posição da célula de carga correspondente.

4.3.2.1 Dados do ensaio 02

Os dados registrados pelo gráfico apresentados na figura 4.9 referem-se ao resultado do ensaio número 02. O valor representado pelo ponto "scan 400" limita a faixa de dados de interesse.

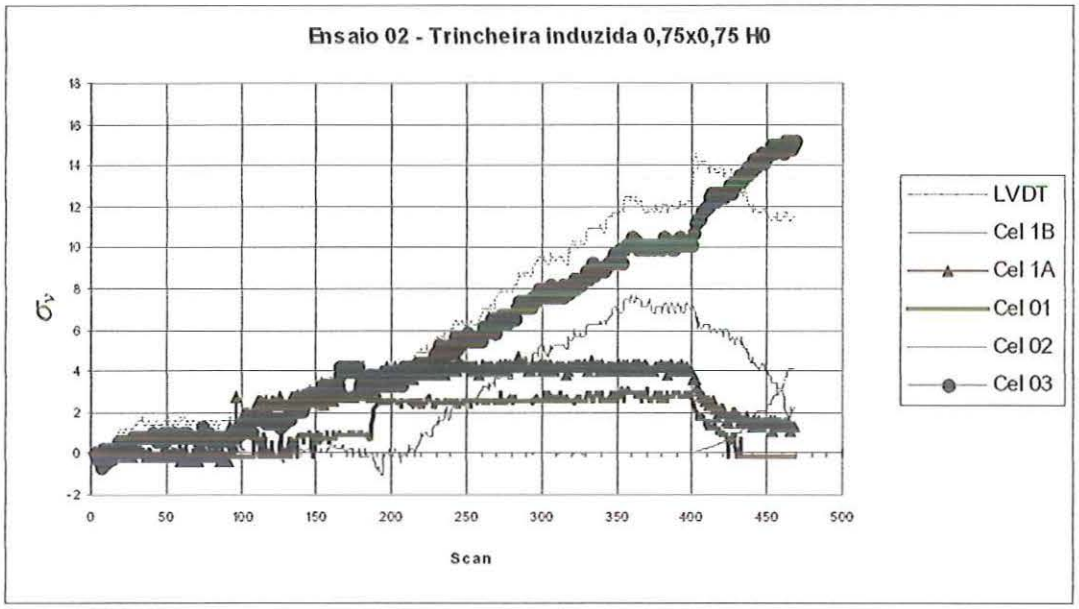


Fig. 4.9 – Ensaio 02 – Registros do ensaio com camada flexível 0,75x0,75 x H/B=0

A redução da dimensão da camada flexível traz novamente as tensões adjacentes [registradas pelas células 02 e 03] para mais perto da região central.

Ao serem comparadas com o ensaio de referência observa-se que as trajetórias de tensões se assemelham.

A figura 4.10 mostra um gráfico com a adimensionalização dos dados do ensaio 02 em função dos valores das tensões verticais registradas divididos pelos seus valores equivalentes de tensões registrados no ensaio de referência [σ_{vT}/σ_{vR}] enquanto que o adimensional dos valores da ordenada é dado em função da posição relativa de *H/B*.

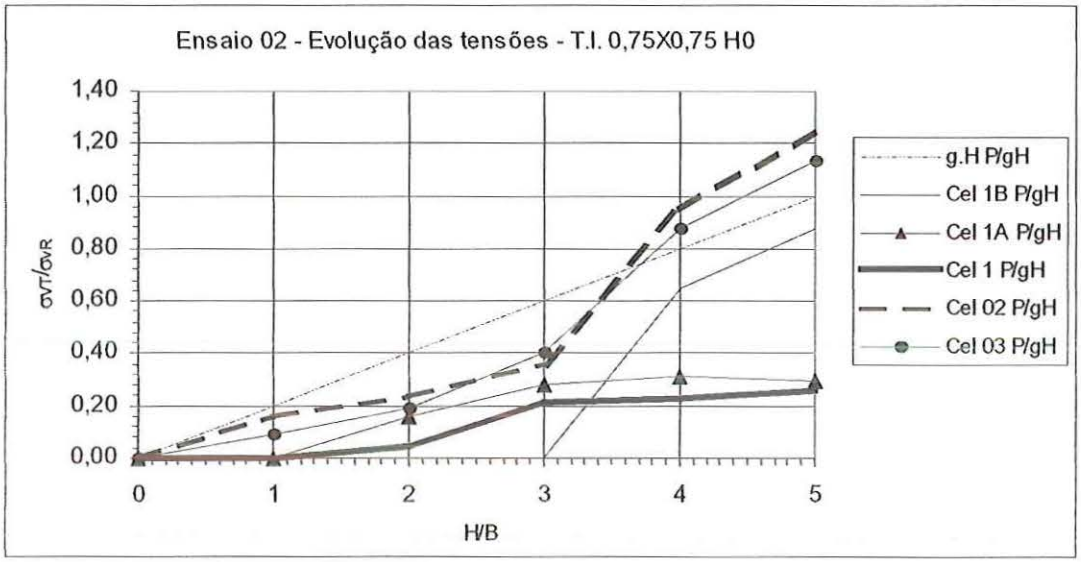


Fig. 4.10 – Ensaio 02 – Adimensionalização dos dados em função de (H/B x σ_{vT}/σ_{vR}).

OS valores de tensão registrados no gráfico da figura 4.9 foram divididos diretamente pelos valores equivalentes, registrados no gráfico da figura 4.3, sendo que os valores obtidos representam a contribuição direta da aplicação da camada flexível numa comparação direta dando origem ao gráfico da figura 4.10.

a) célula 01 – a curva representa a parcela de tensão que chega diretamente ao conduto hipotético e portanto mostra diretamente do beneficio do uso da camada de indução com a configuração apresentada no ensaio 02. Para esta configuração, as tensões relativas registradas foram idênticas ao ensaio 01 ou

seja de 0,26 o que significa dizer que houve uma redução de 74% da carga de solo aplicada e que age efetivamente sobre o conduto.

b) Célula 02 – O uso da camada flexível no ensaio 02 não produziu nenhum alívio na sua região adjacente como observado no ensaio 01. As tensões sofreram um pequeno aumento quando comparadas com o ensaio de referência, ou seja, uma tensão relativa de 1,25 o que significa um aumento de 25%.

c) Célula 03 – O nível de tensões admensionalizadas relativas, que neste ensaio foi de 1,13, se equipara ao do ensaio 01. Isto equivale dizer que o nível de tensão sofreu um aumento de 13% em relação ao ensaio de referência.

d) Célula 1A – O efeito do arqueamento registrado sobre a camada de indução também trouxe uma redução dos valores de tensão registrados. A relação entre as tensões registradas e aplicadas é de apenas 0,30 significando uma redução de 70% no nível das tensões em comparada ao ensaio de referência. Se comparada com o ensaio 01, onde o valor relativo das tensões foi de 0,19, o nível de tensões observadas no ensaio 02 sofreu um aumento de aproximadamente 50%. Entretanto este valor ainda é satisfatório, posto que estas tensões não agem diretamente sobre o conduto hipotético, mas sim sobre a camada de indução.

e) Célula 1B – Observa-se na figura 4.10 uma tendência das tensões lidas pela célula de carga de seguir uma trajetória aproximadamente paralela às tensões registradas pela célula 02 e 03. A tensão relativa encontrada é de 0,88 significando uma redução de 12% em relação ao ensaio de referência. Comparadas ao ensaio 01 percebe-se um aumento do nível de tensões relativas. No ensaio 01, foi registrado, um valor relativo para as tensões igual a 0,78, com uma redução de 22%.

4.3.2.2 Tensões teóricas x tensões registradas

A figura 4.11 traz um gráfico com estimativa teórica das tensões que agem sobre o conduto, numa instalação com a presença da camada flexível com as mesmas dimensões deste ensaio.

Verifica-se que a relação de tensão teórica corresponde aproximadamente a 0,34 relativo aos valores de tensões aplicadas.

Se comparadas com os valores de tensões efetivamente obtidos no ensaio 02 nota-se que ficou acima do valor registrado 0,26.

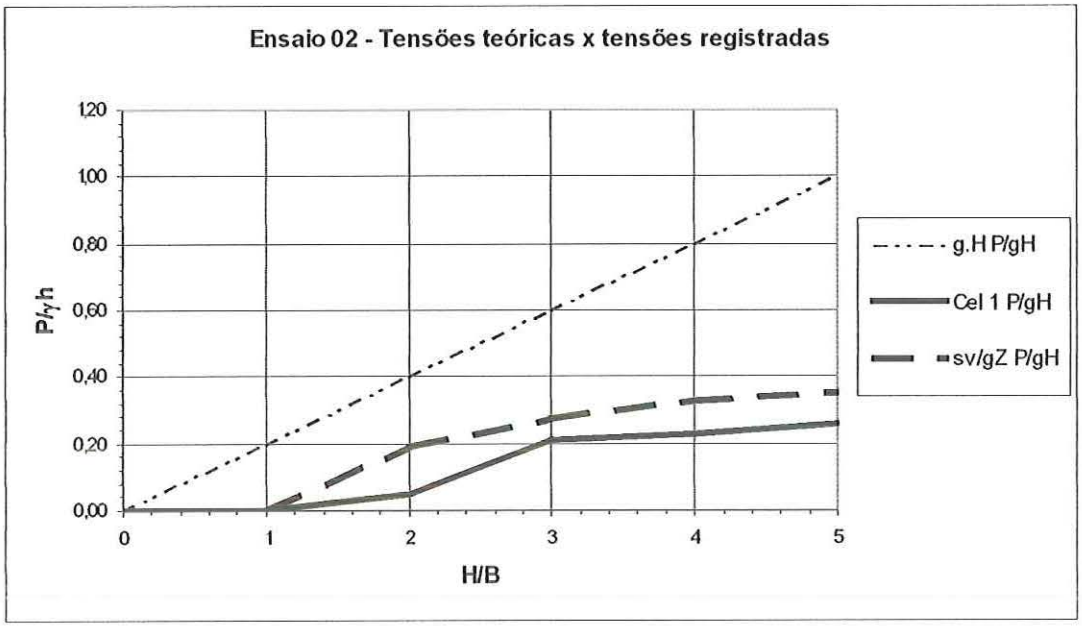


Fig. 4.11 – Gráfico da relação entre as tensões registradas no ensaio 02 e as tensões teóricas.

Ao comparar aos resultados teóricos deste ensaio aos valores teóricos do ensaio 01 percebe-se uma melhor aproximação dos resultados atuais. Constata-se um desvio de 30,8% no valor predito de tensão deste ensaio, o que produz um resultado conservador.

4.3.3 Ensaio número 03

Este consiste na montagem da caixa de reação com areia, com uma nova camada flexível com dimensões b = 5cm x h = 5cm correspondente a relações h/B = 0,5 e b/B = 0,5, sendo posicionada sobre o alçapão com H/B=0, conforme ilustra a figura 4.5.

A célula de carga 1A foi posicionada logo acima da camada flexível, Za = 44 cm, enquanto que a posição da célula 1B foi mantida, Zb = 30 cm. As cotas indicadas por Za e Zb representam a distância entre o nível da superfície que a areia ocupa na caixa de reação até a posição da célula de carga correspondente.

4.3.3.1 Dados do ensaio 03

O gráfico da figura 4.12 representa os resultado dos dados registrados pelo do ensaio número 03. A posição identificada pelo ponto "scan 35" limita a faixa de dados de interesse.

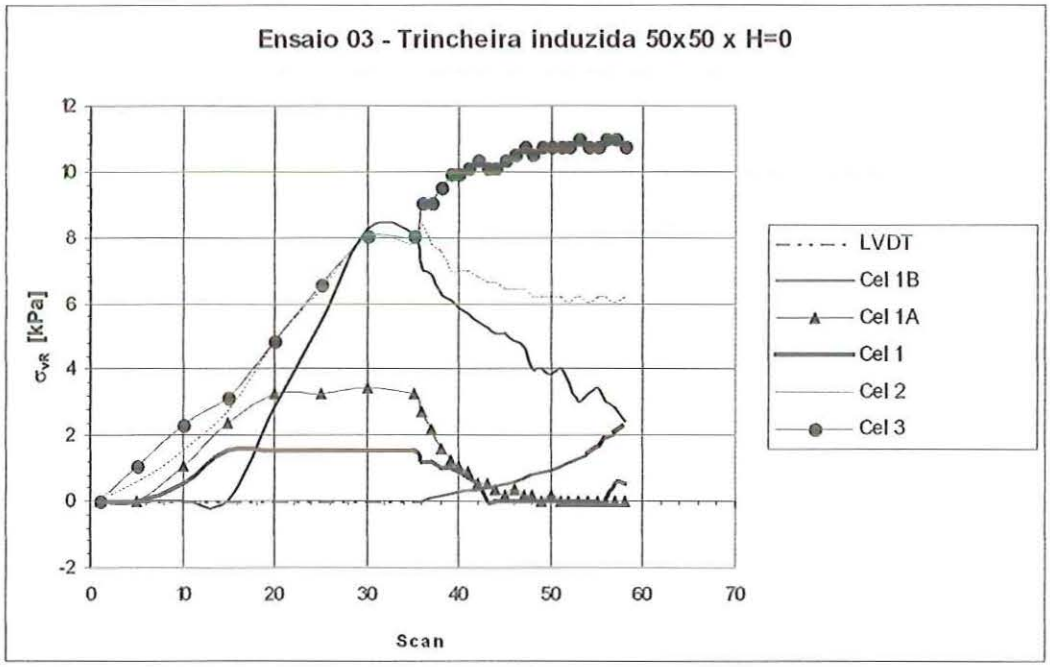


Fig. 4.12 – Ensaio 03 – Registros do ensaio com camada flexível 0,5 x 0,5 x H/B=0

Uma nova redução da dimensão da camada flexível traz novamente as tensões adjacentes [registradas pelas células 02 e 03] para mais perto da região central.

A figura 4.13 traz a adimensionalização dos dados do ensaio 03, comparando-o diretamente ao gráfico do ensaio de referência, figura 4.3.

a) célula 01 – representa a parcela da tensão de solo que chega até o conduto e portanto transmite idéia diretamente do benefício obtido pelo uso da camada flexível com a configuração proposta neste ensaio. Para estas dimensões da camada de indução, as tensões relativas encontradas são inferiores aos valores registrados pelo ensaio 01, ou seja, foi constatado o valor final da tensão relativa igual 0,14 o que significa dizer que houve uma redução de 86% da carga de solo aplicada e que age efetivamente sobre o conduto.

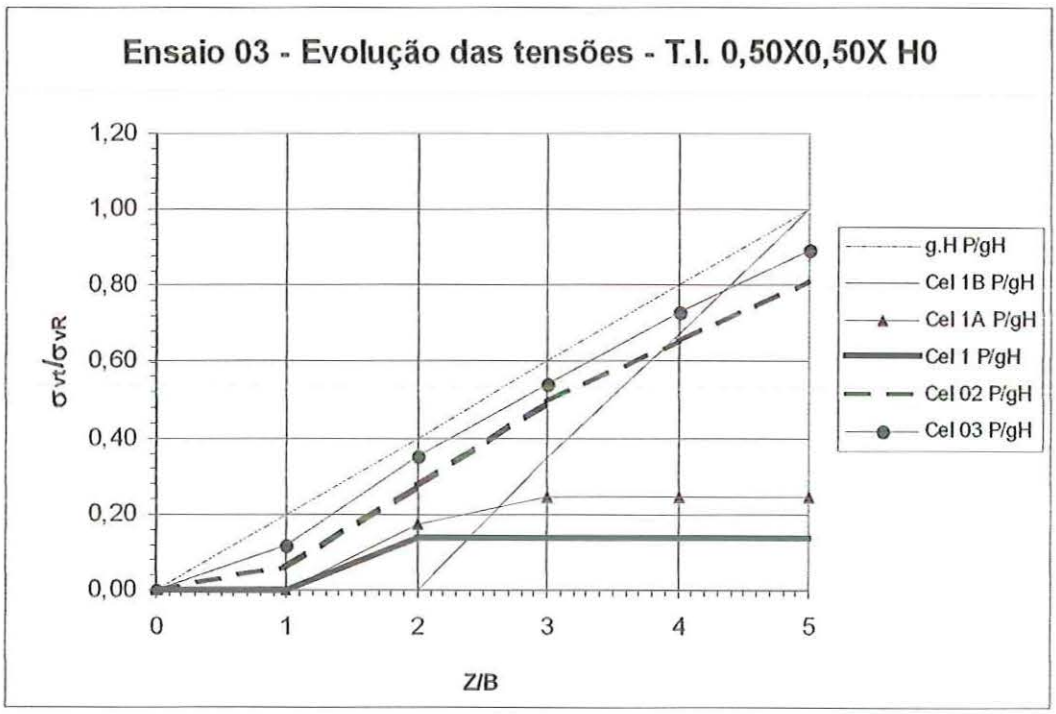


Fig. 4.13 – Ensaio 03 – Adimensionalização dos dados em função de (H/B x $\sigma vT/\sigma_{vR}$)

b) Célula 02 – Neste ensaio o alívio registrado pela célula de carga 02 foi de 19% em relação ao ensaio de referência. Comparado ao ensaio 01 observa-se o valor da tensão relativa encontrada aqui foi de 0,81 enquanto que no ensaio 01 este valor foi de 0,95.

c) Célula 03 – O nível dos valores de tensões relativas adimensionalizadas produzidas neste ensaio foi de 0,90. Isto equivale dizer que a tensão sofreu uma redução de 10% em relação ao ensaio de referência. Comparado ao ensaio número 01 também se nota uma considerável redução no nível das tensões. Os valores das tensões relativas registradas no ensaio 01 foi de 1,39 contra os atuais 0,90.

d) Célula 1A – A relação entre as tensões registradas e aplicadas é de apenas 0,24 significando uma redução de 76% no nível das tensões em relação ao ensaio de referência. Comparando-se com o ensaio 01, onde o valor relativo das tensões foi de 0,19, o nível de tensões observado no ensaio 03 sofreu um aumento de aproximadamente 26,3%.

Célula 1B – Pela analise da figura 4.13 observa-se uma tendência das tensões, registrada pela célula de carga 1B, em seguir uma trajetória aproximadamente paralela a trajetória das tensões registradas pela célula 02. A tensão relativa registrada foi de 1,0 não produzindo nenhuma redução em relação ao ensaio de referência. Ao ser comparada ao ensaio 01 percebe-se um aumento do nível de tensões relativas.

4.3.3.2 Tensões teóricas x tensões registradas

No gráfico da figura 4.14 apresenta-se uma estimativa teórica das tensões que agem sobre o conduto, numa instalação com a presença da camada flexível com dimensões iguais ao do ensaio 03.

Verifica-se que a relação da tensão teórica corresponde aproximadamente a 0,25 relativo aos valores de tensão aplicada.

Ao comparar com os valores de tensões efetivamente do ensaio 03 nota-se que ficou acima do valor registrado 0,14 o que corresponde a um desvio de 78,6%.

Os resultados obtidos neste ensaio comparado aos valores teóricos do ensaio 01 onde o valor teórico foi de 0,39 estão correspondendo a um desvio de 50%, mostrando um aumento no erro do valor teórico.

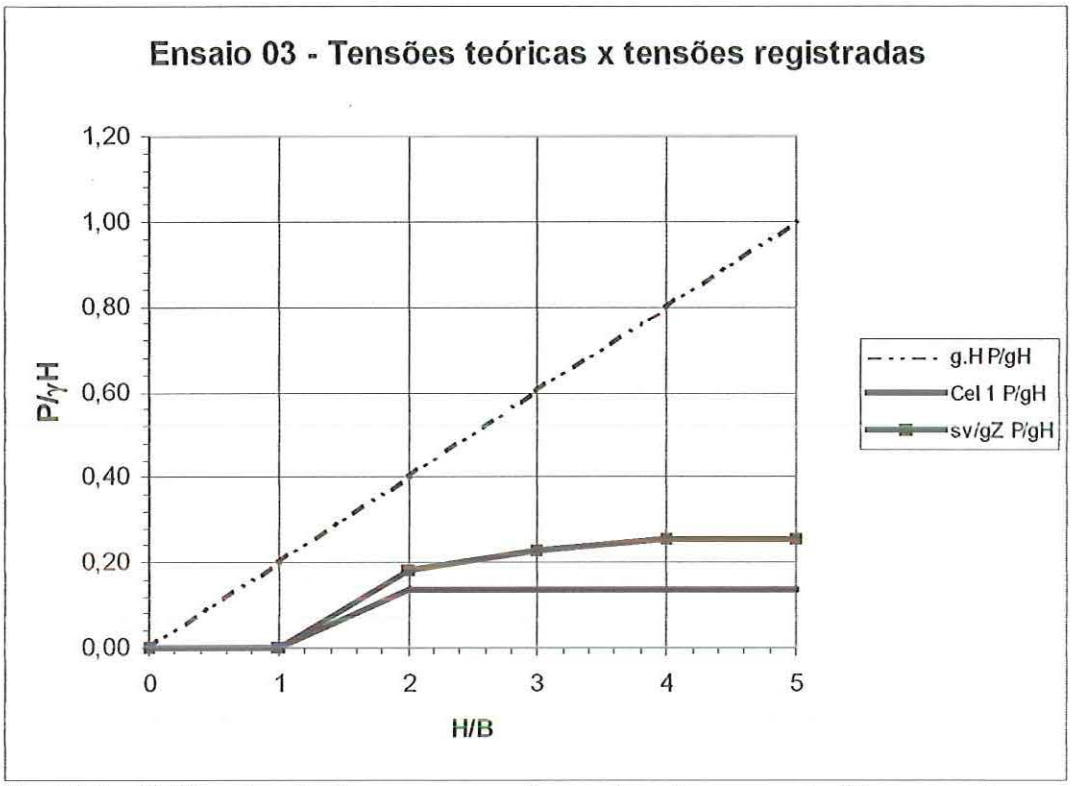


Fig. 4.14 – Gráfico da relação entre as tensões registradas no ensaio 03 e as tensões teóricas.

4.3.4 Ensaio número 04

Na montagem da caixa de reação com areia do ensaio de número 04, é instaladas uma camada flexível com dimensões b = 3cm x h = 3cm correspondentes as relações h/B = 0,3 e b/B = 0,3 posicionada sobre o alçapão com H/B=0, conforme ilustra a figura 4.4.

A célula de carga 1A está posicionada logo acima da camada indutora, Z_a = 46 cm, enquanto que a posição da célula 1B manteve-se em Z_b = 30 cm. As cotas indicadas por Z_a e Z_b representam a distância entre o nível da superfície que a areia ocupa na caixa de reação até a posição da célula de carga correspondente.

4.3.4.1 Dados do ensaio 04

A figura 4.15 traz o gráfico referente aos resultados registrados do ensaio número 4. O ponto representado pelo registro "scan 350" limita a faixa de dados de nosso interesse.

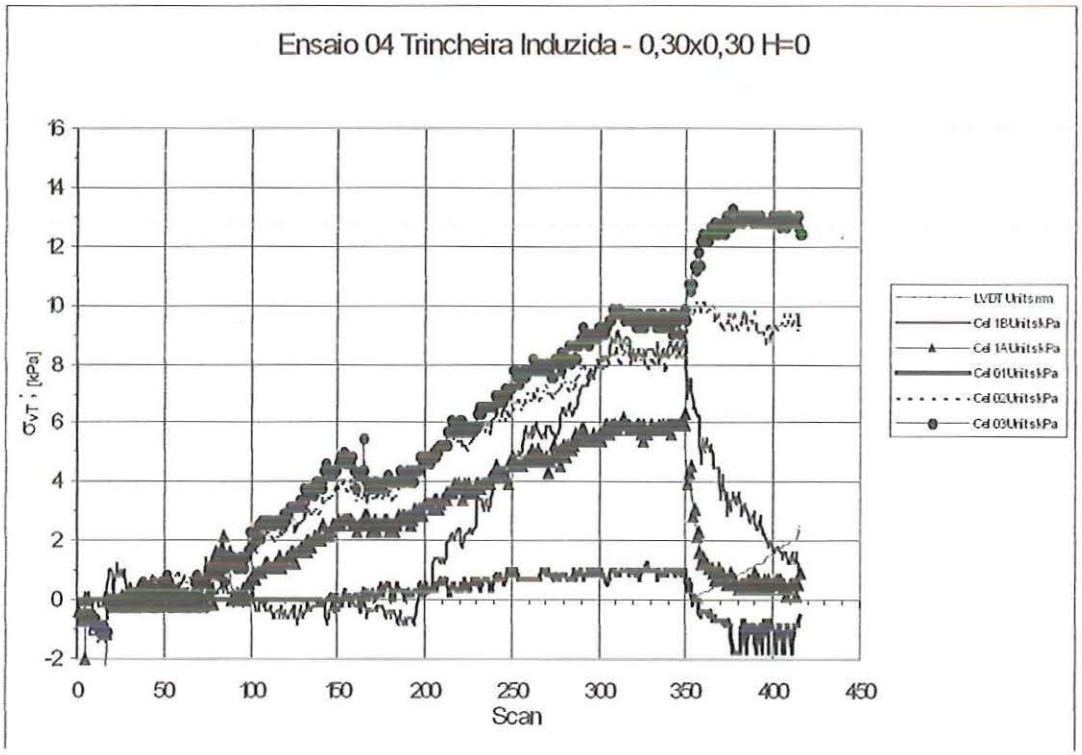


Fig. 4.15 – Ensaio 04 – Registros do ensaio com camada flexível 0,3 x 0,3 x H/B=0

A realização deste ensaio não havia sido prevista no plano inicial, entretanto, em função dos ótimos valores observados nos ensaios anteriores acreditou-se que poderia haver a possibilidade de conseguir uma redução do tamanho da camada indutora sem grandes perdas de eficácia.

O tamanho mínimo da camada flexível ficou limitado ao diâmetro da célula de carga central que é de 30mm, entretanto é possível que se consiga relações de *b/B* e *h/B* inferiores ao valor mínimo deste ensaio.

Observa-se neste ensaio, que a redução da dimensão da camada indutora não trouxe grandes alterações nas tensões adjacentes [células 02 e 03].

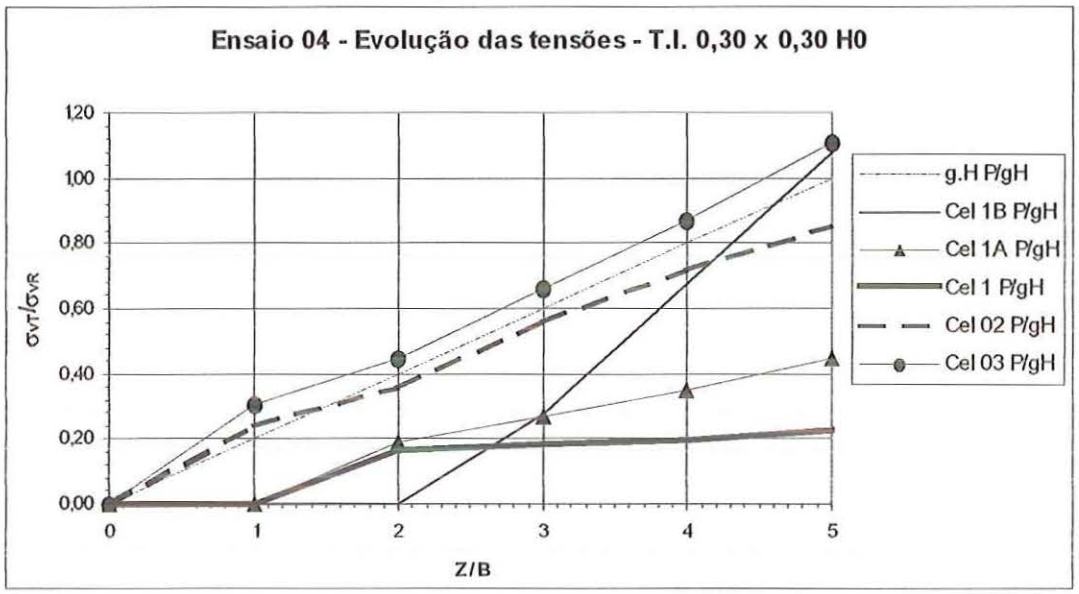


Fig. 4.16– Ensaio 04 – Adimensionalização dos dados em função de (H/B x σ_{vT}/σ_{vR})

A adimensionalização dos dados do ensaio 04 esta representada no gráfico da figura 4.16 e faz uma comparação diretamente com o gráfico do ensaio de referência.

a) Célula 01 – fornece a indicação da parcela de tensão de solo que atinge o conduto e mostrando o benefício direto produzido pelo uso da camada flexível com a configuração proposta neste ensaio. As tensões relativas aqui observadas ficaram ligeiramente inferiores aos valores registrados pelo ensaio 01, ou seja, o valor final da tensão relativa ao ensaio de referência igual 0,23 e, portanto

constata-se que houve uma redução de 77% da carga de solo aplicada e que age efetivamente sobre o conduto.

b) Célula 02 – Neste ensaio o valor registrado pela célula de carga 02 foi de 0,85 significando um alívio de 15% relativamente ao ensaio de referência. Se comparado ao ensaio 01 observa-se o valor da tensão relativa registrada no ensaio 01 foi de 0,95.

c) Célula 03 – O nível dos valores de tensões admensionalizadas relativas produzidas neste ensaio foi de 1,11. Isto equivale dizer que a tensão sofreu um aumento de 11% em relação ao ensaio de referência. Comparado ao ensaio número 01 observa-se uma redução no nível das tensões. Os valores das tensões relativas registradas no ensaio 01 foi de 1,39 contra os atuais 1,11.

d) Célula 1A – A relação entre as tensões registradas neste ensaio e comparada com a tensão aplicada no ensaio de referência é de apenas 0,45 significando uma redução de 55% no nível das tensões. No ensaio 01 onde o valor relativo das tensões foi de 0,19 o nível de tensões observado no ensaio 04 sofreu um aumento de aproximadamente 137%.

e) Célula 1B – A tensão relativa registrada foi de 1,08 produzindo um aumento de 8% no nível de tensões em relação aos valores observados no ensaio de referência. De modo semelhante ao ser comparada ao ensaio 01 percebe-se um aumento de aproximadamente 38% do nível de tensões relativas.

4.3.4.2 Tensões teóricas x tensões registradas

No gráfico da figura 4.17 apresenta-se uma estimativa teórica das tensões que agem sobre o conduto, numa instalação com a presença da camada flexível com dimensões iguais às deste ensaio.

Verifica-se que a relação de tensão teórica corresponde aproximadamente ao valor 0,15 relativo as tensões aplicadas, enquanto que os valores de tensões efetivamente obtidos no ensaio 04 ficou acima do valor previsto. O valor encontrado foi de 0,23 o que corresponde a um desvio negativo de 53% quando comparado ao valor obtido pela aplicação da equação (4.1).

Este foi o único valor teórico, calculado através da equação (4.1) que ficou aquém do valor de tensão efetivamente registrado por um ensaio.

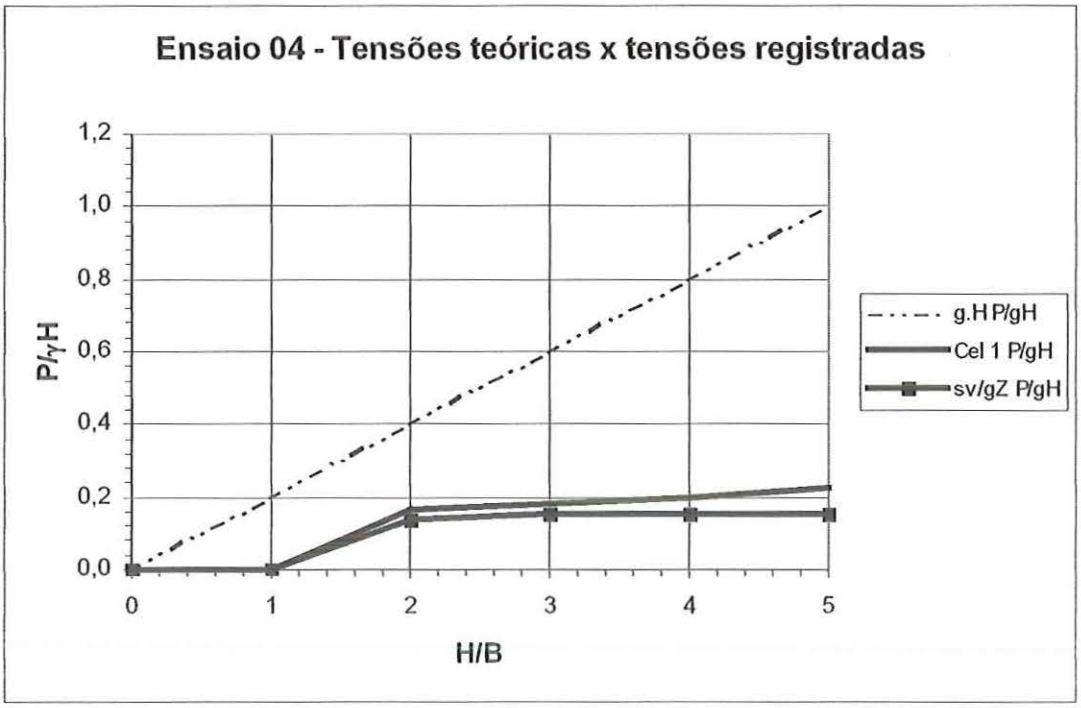


Fig. 4.17 – Gráfico da relação entre as tensões registradas no ensaio 04 e as tensões teóricas.

4.4 Analise dos ensaios da série B.

4.4.1 Ensaio número 05

A série de ensaios, que se inicia agora compreende os ensaios de números 05 a 08, consistem, de uma maneira geral, da montagem da caixa de reação com areia, do mesmo modo como descrito anteriormente nos ensaios da série A, porém com a camada flexível posicionada sobre o alçapão a uma distância fixa do fundo da caixa igual a 10 cm, ou seja, obedecendo à relação *H/B* = *1*, conforme ilustra a figura 4.18.

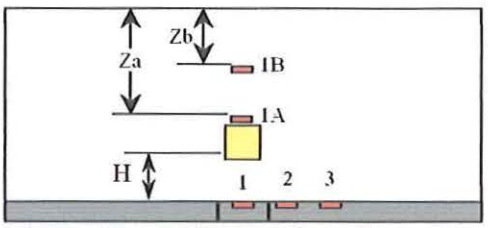


Fig. 4.18 – Série B – disposição das células de carga na caixa de reação.

Em função da introdução da camada de areia entre a camada flexível e o fundo da caixa de reação, as células de carga foram redistribuídas, conforme ilustra a figura 4.18, sendo que a cel 1A está posicionada imediatamente acima da camada flexível, com recobrimento Za = 29 cm, enquanto a posição da célula 1B teve seu recobrimento Z_b = 20 cm.

As posições Za e Zb representam o recobrimento das células de carga, isto é à distância entre o nível da superficie, ocupado pela areia na caixa de reação, até a posição da célula de carga correspondente 1A ou 1B.

4.4.1.1 Dados do ensaio 05

Os dados registrados pelo gráfico apresentados na figura 4.19 referem-se ao resultado do ensaio número 05.

O ponto identificado por "scan 437" limitando a faixa de dados de nosso interesse. À direita desta linha vertical, encontram-se os valores de tensão obtidos através do avanço do alçapão e não serão utilizados nessa analise.

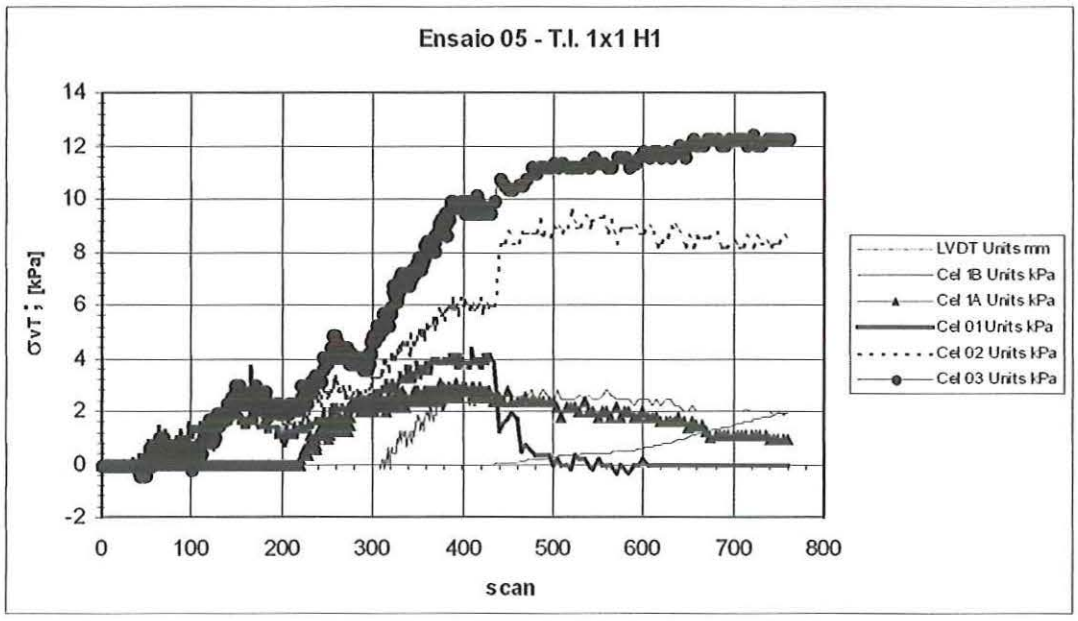


Fig. 4.19 – Ensaio 05 – Tensões registradas com $b/B = 1$; $h/B = 1$; $H/B = 1$

A figura 4.20 traz a adimensionalização dos dados do ensaio 05 dentro da faixa de interesse, sendo que o adimensional da abscissa foi obtido em função dos valores das tensões registradas neste ensaio divididos pelos seus respectivos equivalentes valores de tensões registrados no ensaio de referência, enquanto que o adimensional dos valores da ordenada foi obtido em função da posição relativa de H/B. Como os valores de tensão registrados no gráfico da figura 4.20 foram divididos diretamente pelos valores equivalentes, registrados no gráfico da figura 4.3, os valores resultantes representam a contribuição direta da aplicação da trincheira flexível com as características descritas, utilizada neste ensaio.

a) Célula 01 – Representa a parcela de tensão que chega efetivamente ao conduto hipotético e, portanto, mede o benefício do uso da camada flexível com a configuração ensaiada. O valor de tensão relativa final observada agindo sobre a célula de carga é de 0,363 isto que significa dizer que houve uma redução de ≅ 64% da carga de solo aplicada.

b) Célula 02 – Observamos que o uso da camada flexível produz um alívio também na sua região adjacente. As tensões sofreram uma redução correspondente de 38%.

c) Célula 03 – Efetivamente esta célula é que recebeu a maior parcela das tensões devido ao arqueamento. Observou-se um acréscimo de tensões de 6% em relação às tensões registradas e aplicadas.

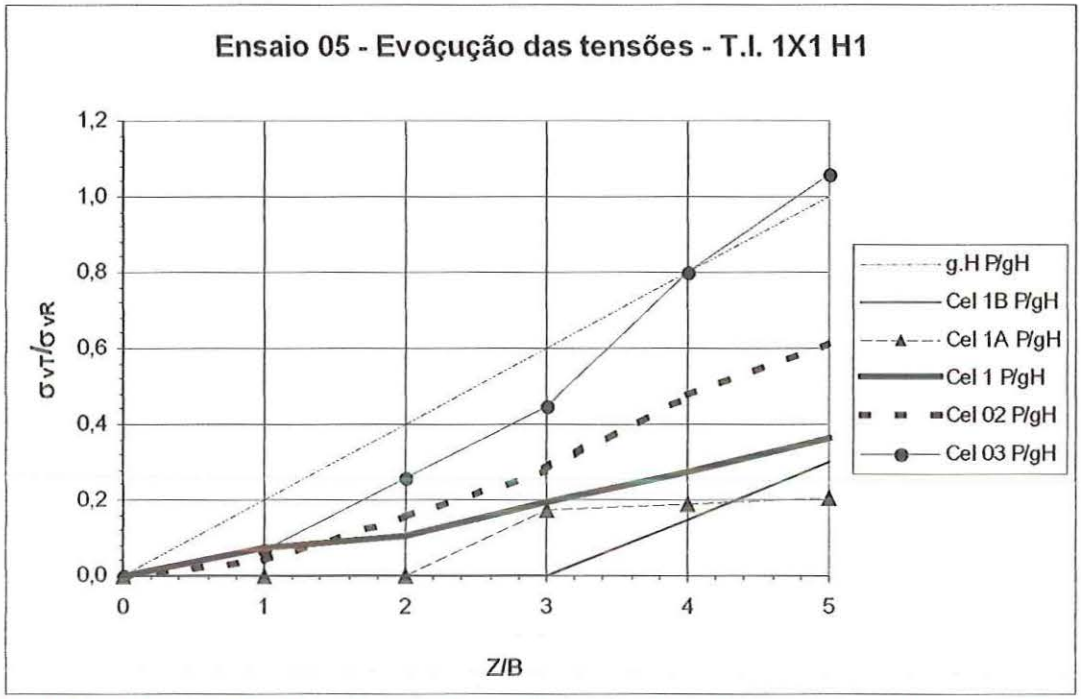


Fig. 4.20 – Ensaio 05 – Tensões relativas adimensionalizadas em função do ensaio 01

d) Célula 1A – O efeito do arqueamento produzido imediatamente sobre a camada flexível também trouxe uma redução dos valores de tensão registrada imediatamente acima da mesma. A relação entre as tensões registradas e aplicadas é de apenas 0,20 significando uma redução de 80% no nível das tensões.

e) Célula 1B – Observa-se na figura 4.20 uma tendência das tensões registradas pela célula de carga em seguir uma trajetória aproximadamente paralela às tensões registradas pela célula 02. A tensão relativa registrada foi de 0,30 significando uma redução de 70% em relação ao ensaio de referência.

EESC-USP Biblioteca Campus de S. Carlos

De um modo geral, todos os valores de tensões tiveram grandes variações devido à introdução de uma camada de areia de espessura igual a *1B*, o equivalente a *1D* em relação a um tubo. De maneira geral esta camada de areia aumenta os valores de tensão que agem diretamente sobre a célula 1 e reduz os valores de tensão atuantes sobre as células 1B e 1A pois estão posicionadas mais próximas da superfície do solo.

Em muitas situações práticas de aplicação de uma tubulação poderá exigir o uso de uma camada de solo, com espessura de *1D*, entre o topo do tubo e a camada flexível, de modo a proteger o tubo de diversos outros problemas como por exemplo:

- Transiente hidráulico: Este é um fenômeno comum em adutoras. Nos condutos forçados o transiente surge em decorrência da variação de velocidade de escoamento, na forma de uma sucessão de ondas de choques de baixa pressão e de alta pressão. Em determinadas situações as ondas de baixa pressão assumem valores perigosamente baixos para os tubos flexíveis, exigindo uma maior resistência e portanto uma maior dependência da interação solo-tubo. Em certas situações é antagônica a necessidade de se obter reduções de cargas sobre o tubo e ao mesmo tempo garantir uma resistência mínima às cargas de vácuo, devendo ser respeitado a necessidade de manter o afastamento da camada flexível do tubo por questões estruturais.
- Lençol freático elevado: Em diversas regiões nos deparamos com a presença de lençol freático, tornando-se um fator limitante á aplicação da camada flexível diretamente sobre o tubo sob pena do mesmo flutuar ou de se movimentar. O movimento descontrolado do tubo pode produzir tensões nas suas extremidades e no seu sistema de vedação, comprometendo a estanqueidade e/ou a instalação.

A altura de *1B* ou o equivalente *1D*, adotado para a espessura da camada de solo que separa o tubo da camada flexível, não tem exatamente uma base teórica, mas somente intuição e observações de práticas adotadas em campo.

Ao se comparar os valores registrados neste ensaio com os valores equivalentes registrados no ensaio 01, onde a camada flexível foi aplicada diretamente sobre o alçapão, obtivemos os dados organizados na tabela 4.2.

Observa-se que as tensões aplicadas nas células de cargas adjacentes sofrem uma redistribuição, devido à presença da camada de indução, reduzindo as tensões.

Tabela 4.2 - Tensões relativas para posição da camada indutora *H/B* = 1

Ensaios	Referência	Cel 1B	Cel 1A	**Cel 01**	Cel 02	Cel 03
	$\sigma_{1T} / \sigma_{1R}$	$\sigma_{1T} / \sigma_{1R}$	$\sigma_{1T} / \sigma_{1R}$	$\sigma_{1T} / \sigma_{1R}$	$\sigma_{1T} / \sigma_{1R}$	$\sigma_{1T} / \sigma_{1R}$
1	1	0,78	0,19	**0,26**	0,95	1,39
5	1	0,300	0,203	**0,363**	0,615	1,060
$\sigma_{v5} / \sigma_{v1}$	1	0,386943	1,070866	**1,411565**	0,64561	0,762249

Já o comportamento das células de carga posicionado no plano vertical ficou dividido. As células 01 e 1A sofreram um aumento de tensões, já esperado enquanto que a célula de carga 1B acompanhou o comportamento das células de carga instaladas na posição adjacentes.

4.4.1.2 Tensões teóricas x tensões registradas

No gráfico da figura 4.21 é apresentada uma estimativa das tensões teóricas que agem sobre o conduto, considerando a presença da camada flexível, conforme dimensões do ensaio 05.

Verifica-se que a tensão registrada pela célula de carga 01 corresponde 0,363 da tensão aplicada enquanto que a tensão teórica encontrada foi igual a 0,557. Portanto o desvio entre a tensão teórica comparada à tensão registrada é de 53,4 %.

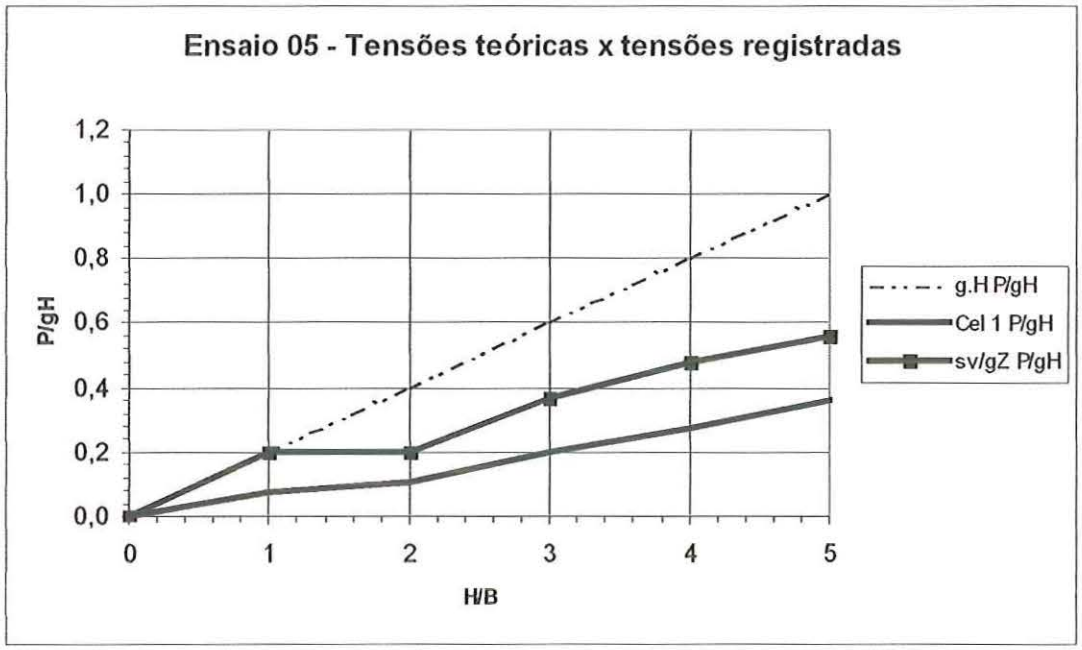


Fig.4.21 - Gráfico da relação entre tensões registradas no ensaio 05 e as tensões teóricas calculadas.

4.4.2 Ensaio número 06

O ensaio 06 foi realizado de maneira semelhante ao ensaio 05, alterando-se as dimensões da camada flexível para 7,5 cm x 7,5 cm, mantendo-se o posicionamento num plano situado a 10 cm acima do plano do fundo da caixa de reação.

4.4.2.1 Dados do ensaio 06.

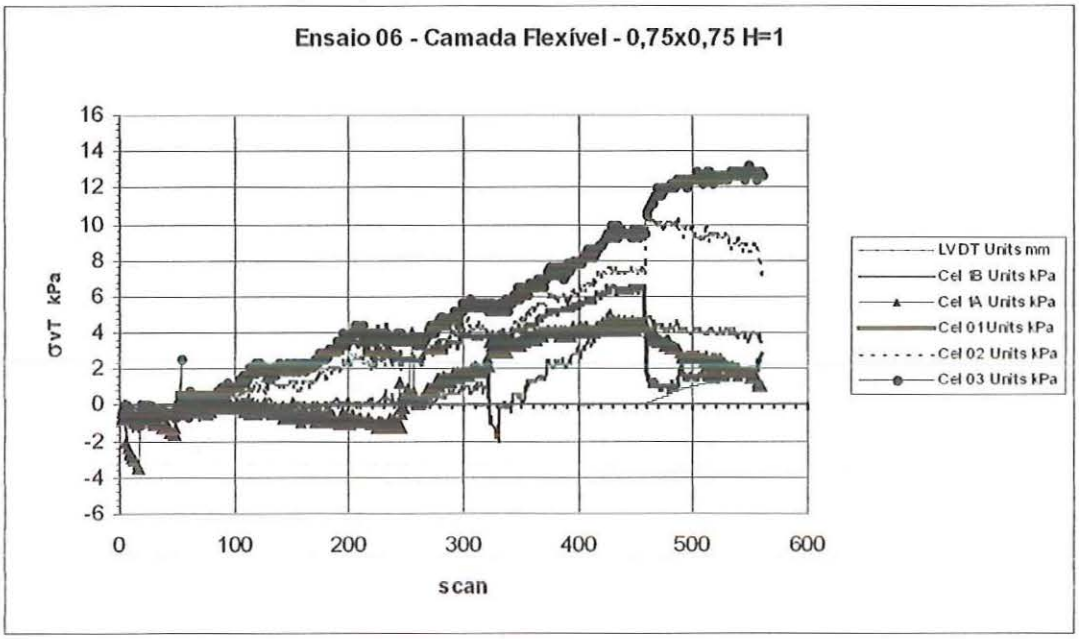


Fig. 4.22 – Ensaio 06 – Registros do ensaio com 0,75 x 0,75; $H/B = 1$

A figura 4.22 apresenta o gráfico dos registros do ensaio 06.

A posição referente ao registro scan 460 limita os dados de nosso interesse. A região a esquerda deste ponto será objeto de nossa análise enquanto que a região situada à direita não será considerada.

Os dados registrados no ensaio 06 foram comparados diretamente aos registros do ensaio de referência gerando um segundo gráfico apresentado na figura 4.23, representando os benefícios obtidos pela presença da camada flexível.

a) Célula 01 – a curva da figura 4.23 mostra que a presença da camada flexível vem trazer uma importante contribuição na redução das cargas. A tensão relativa atuante sobre a célula 01 comparada ao ensaio de referência é de 0,56 representando um alívio de 44%. Se comparada ao ensaio 05 encontramos um valor registrado de 0,36 representando um incremento de ≅ 54% no nível de tensões.

b) Célula 02 - Observamos que o uso da camada flexível produz um alívio também na sua região adjacente. As tensões relativas atuantes são de 0,77 o que significa que a redução de tensões produzida foi de 23%. Também pode ser comparada aos valores de tensões relativas observadas no ensaio 05 neste caso encontramos os atuais 0,77 contra tensão relativa de 0,62 produzindo um incremento no nível de tensões de ≅ 26%.

c) Célula 03 – O gráfico da figura 4.23 registra uma tensão relativa de 1,06 demonstrando haver um incremento de tensões verticais adjacentes de 6%. Ao ser comparada com o ensaio 05 não foi observada nenhuma alteração dos níveis de tensões.

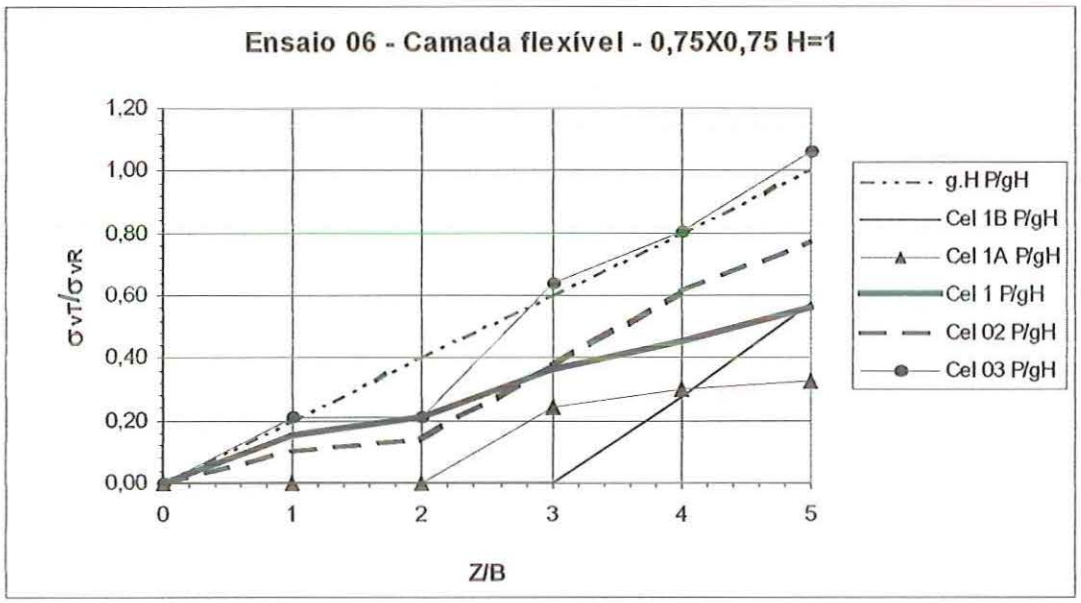


Fig. 4.23 – Ensaio 06 – Adimensionalização dos dados do ensaio 06.

d) Célula 1A – O nível de tensão relativa ao ensaio de referencia já admensionalizada registrada foi de 0,32. Comparando ao ensaio 05, os valores de tensões relativas registradas neste ensaio sofreram um aumento. Foi constatado que os valores de tensões passaram de 0,20 no ensaio 05 para 0,32 no ensaio 06, representando um aumento de 60%.

Tabela 4.3 – Comparação dos dados do ensaio 06 em relação ao ensaio 05

Ensaios	Referência	Cel 1B	Cel 1A	**Cel 1**	Cel 02	Cel 03
	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}
5	1.00	0.30	0.20	**0.36**	0.62	1.06
6	1.00	0.58	0.32	**0.56**	0.77	1.06
σ_{v5}/σ_{v1}	1.00	1.918	1.599	**1.542**	1.259	1.000

e) Célula 1B – Verifica-se que a presença da camada flexível produz uma redução de tensões relativas ao ensaio de referência, sendo que o valor relativo registrado foi de 0,58 o que demonstra uma atenuação no nível das tensões aplicadas de 42%. Ao ser comparada com o ensaio 05 verifica-se que houve uma evolução do nível de tensões de 0,30 para 0,58 representando um acréscimo efetivo nas tensões de 92%.

4.4.2.2 Tensões teóricas x tensões registradas

O gráfico, apresentado no gráfico da figura 4.24 mostra o comportamento das tensões teóricas frente aos dados obtidos com a realização deste ensaio.

Observa-se que o valor teórico de predição das tensões fica ligeiramente abaixo das tensões registradas.

O valor da tensão registrada foi de 0,561 enquanto que o valor da tensão teórica calculada foi igual a 0,518. Portanto o desvio dos valores de tensão calculada em relação ao valor registrado é igual a (-) 7,66%.

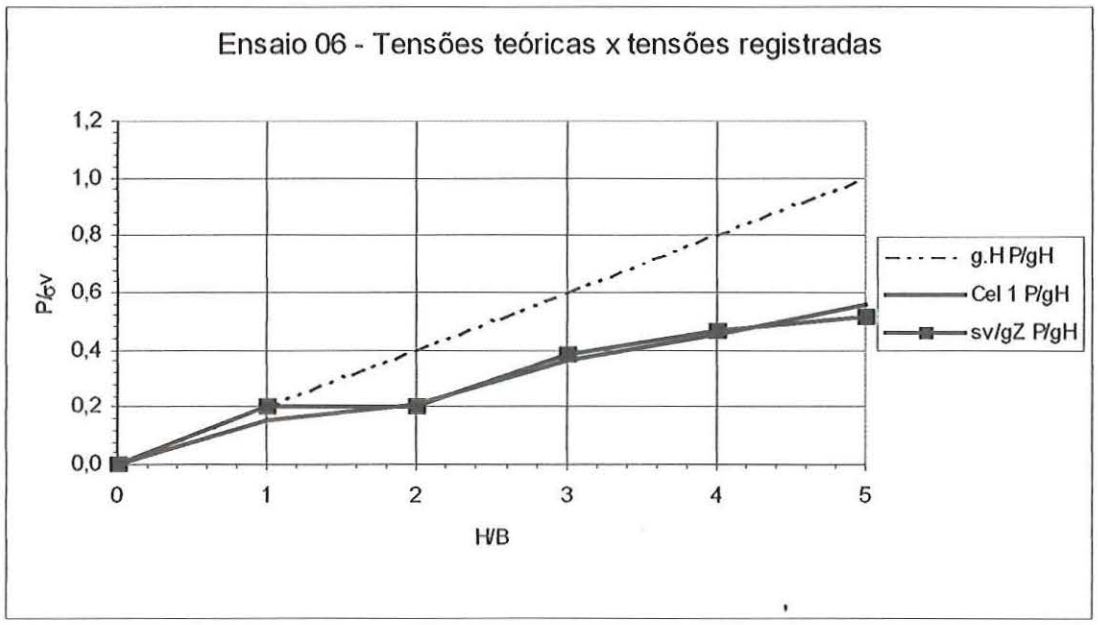


Fig. 4.24 – Ensaio 06 – Tensões teóricas x tensões registradas.

4.4.3 Ensaio número 07

A montagem do ensaio 07 se caracteriza pela presença de uma camada flexível medindo b = 5 cm x h = 5 cm posicionada num plano paralelo ao fundo da caixa a uma distância H = 10 cm. A disposição das células segue o esquema apresentado na figura 4.18, sendo que a célula 1A foi posicionada na cota Za = 34,5 cm enquanto que a célula 1B foi posicionada na cota Zb = 20 cm.

4.4.3.1 Dados do ensaio 07

Os resultados registrados a partir do ensaio 07 podem ser observados no gráfico da figura 4.25.

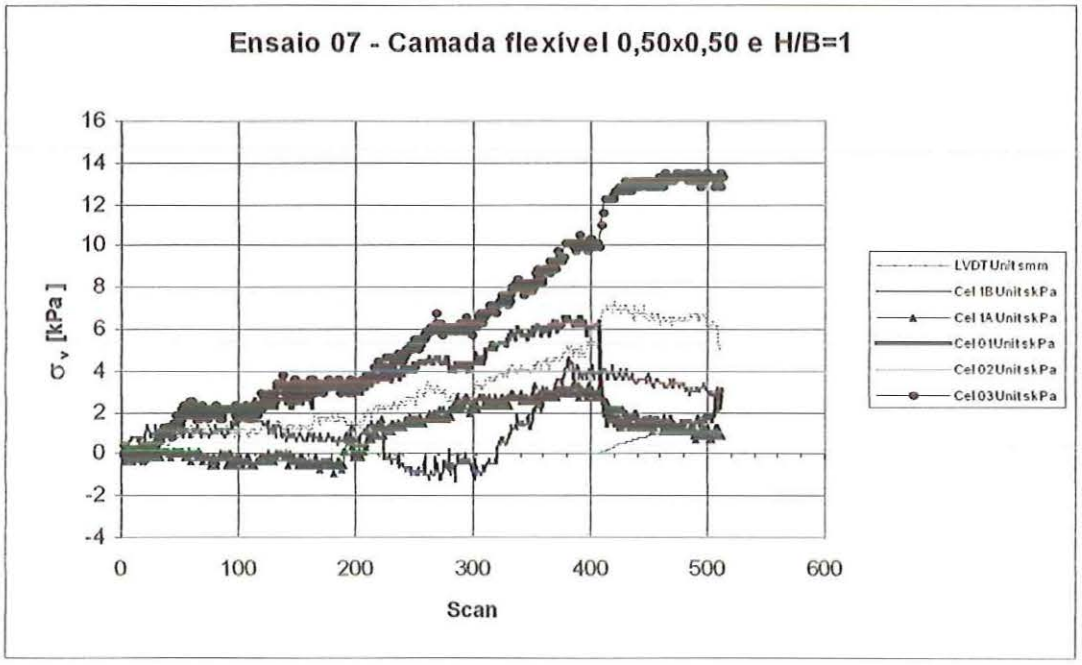


Fig. 4.25 – Ensaio 07 – camada flexível 0,5 x 0,5 e H/B=1

O valor da abscissa "scan 410" delimita os resultados de nosso interesse, sendo que à direita deste ponto nenhum dado será utilizado para efeito desta analise.

Apesar da redução das dimensões da camada flexível não houve nenhuma alteração significativa nos níveis de tensões registradas no ensaio.

A figura 4.26 traz um gráfico com a adimensionalização comparativa dos dados registrados no ensaio 07 em relação ao ensaio de referência, representando a contribuição direta da aplicação da camada indutora, numa comparação direta.

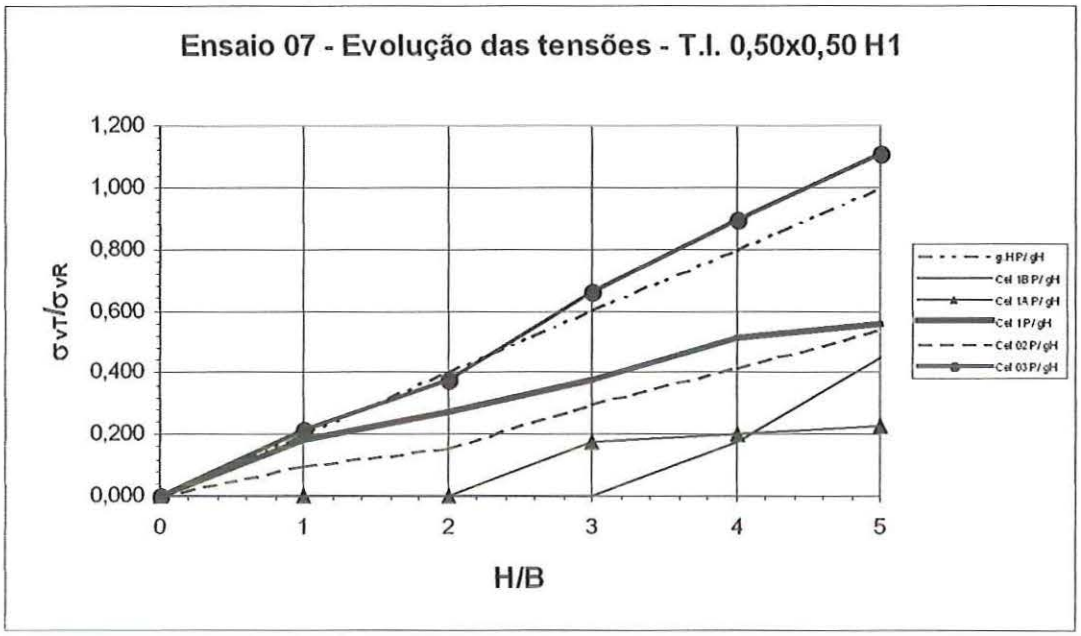


Fig. 4.26 – Ensaio 07 – Adimensionalização dos dados em função de (H/B x $\sigma_v/\gamma H$)

a) Célula 01- Os valores de tensões registrados pela célula de carga 01, demonstram que o nível de tensão relativa é de 0,56 indicando que a redução de tensões foi da ordem de 44% quando comparada ao ensaio de referência. Este valor ficou praticamente igual ao valor observado no ensaio 06. Se compararmos os valores aqui registrados com o primeiro ensaio desta série, ou seja, o ensaio número 05, constata-se a tendência de um aumento nos valores de tensões.

A observação dos registros da tabela 4.4 permite-nos constatar que as regiões circunvizinhas da camada flexível apresentaram as menores tensões, atribuídas ao efeito do arqueamento do solo e a partir dai, à medida que se afasta desta região, observa-se o crescimento das tensões. Em qualquer dos dois ensaios a analise dos dados apresentados nos indicam que se percorrermos a tabela a partir da célula 01 os valores de tensões aumentam progressivamente com o afastamento, tanto para a

direita, representando um mesmo plano horizontal, como para a esquerda, representando um plano vertical.

Tabela 4.4 – Comparação dos dados do ensaio 07 em relação ao ensaio 05

Tensões relativas entre os ensaios 5 e 7 para posição da camada indutora H/B =1						
Ensaios	Referência	Cel 1B	Cel 1A	**Cel 1**	Cel 02	Cel 03
Unidades	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}
5	1	0.300	0.203	**0.363**	0.615	1.060
7	1	0.449	0.230	**0.560**	0.536	1.108
σ_{v7}/σ_{v5}	1	1.498	1.132	**1.542**	0.871	1.045

b) Célula 02 – O uso da camada flexível neste caso produz um alívio de tensões em relação ao ensaio de referência, da ordem de 46% no valor das tensões aplicadas. Também se observa um pequeno alívio no nível das tensões quando comparamos com o valor do ensaio 05, sendo que neste caso a redução de tensões ficou em torno de 13%.

c) Célula 03 – Constata-se que a tensão registrada no ponto 03 segue a tendência geral de crescimento, produzida pela diminuição das dimensões da camada flexível. A tensão relativa ao ensaio de referência é de 1,108, demonstrando que houve um aumento de 10,8% em relação à tensão aplicada. A tabela 4.4 apresenta os efeitos observados na instalação da camada flexível deste ensaio e compara com os valores típicos da instalação 05. Observa-se que o nível de tensões evoluiu de 1,060 para 1,108, representando um aumento relativo de 4,5%.

d) Célula 1A – Foi registrado uma tensão de 0,23 relativamente ao ensaio de referência, indicando uma redução de tensões da ordem de 77%. A comparação com o ensaio 05 mostra que as tensões passaram do nível de 0,203 para 0,230, implicando em um incremento da ordem de13%.

e) Célula 1B - os registros no gráfico da figura 4.26 demonstram que o valor de tensões registradas pela célula de carga 1B é de 0,45, indicando que a redução de tensões foi da ordem de 55% quando comparada ao ensaio de referência. Este valor ficou 19,6% abaixo do valor observado no ensaio 06. Se

compararmos os valores aqui registrados com ensaio número 05 constata-se a tendência de um aumento nos valores de tensões da ordem de 49,8%.

4.4.3.2 Tensões teóricas x tensões registradas

A figura 4.27 traz um gráfico, onde são comparados os valores de tensões calculadas, teoricamente a partir da equação 4.1 e compara com os valores registrados durante a realização do ensaio 07.

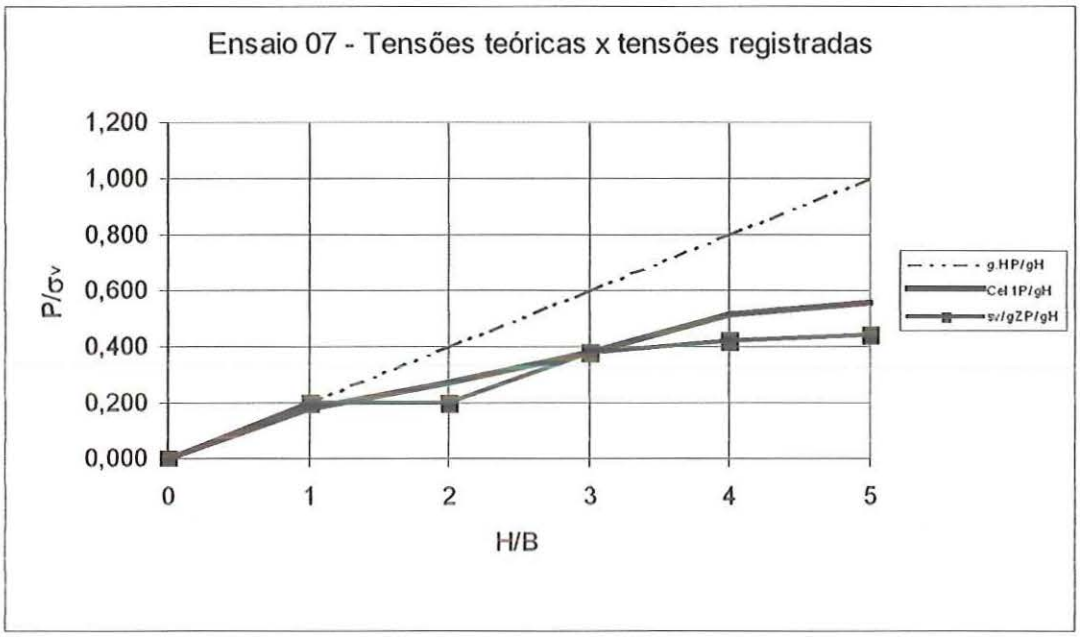


Fig. 4.27 – Ensaio 07 – Tensões teóricas x tensões registradas.

O valor registrado foi igual a 0,56 enquanto que o valor teórico obtido através de cálculo foi de 0,46. O desvio de cálculo foi igual a (–)17,86%. Observa-se que os valores calculados ficaram abaixo dos valores efetivamente registrados. Normalmente seria desejável que os valores obtidos a partir do cálculo teórico não fiquem abaixo dos valores registrados no ensaio, demonstrando não ser uma equação adequada a esta aplicação.

4.4.4 Ensaio número 08

A montagem deste ensaio consistiu de uma camada flexível medindo 3 cm x 3 cm sendo instalada no centro da caixa de reação em um plano horizontal, paralelo ao plano que passa pelo fundo da caixa, posicionado a uma altura distante 10 cm deste último. Observa-se uma redução da camada flexível em relação ao ensaio 07.

As posições de instalação das células de carga 1A e 1B foram Z_a = 36 cm e Z_b=20 cm a contar da superfície do solo na caixa de reação, obedecendo à configuração geral para este grupo de ensaios, conforme indicada na figura 4.18.

4.4.4.1 Dados do ensaio 08

No gráfico da figura 4.28 o ponto representado pela abscissa "scan 465" limita os dados de nosso interesse. Serão utilizados para efeito desta analise os dados que aparecem à esquerda deste ponto enquanto que os dados da direita serão desprezados.

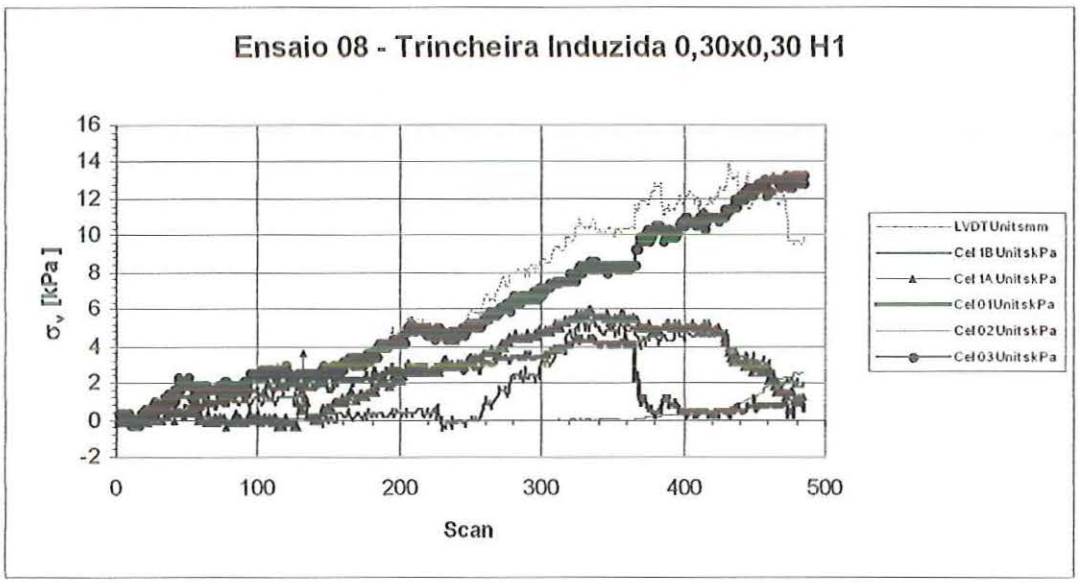


Fig. 4.28 – Ensaio 08 – Registros do ensaio com camada flexível 0,3 x 0,3; H/B=1

A figura 4.29 mostra um gráfico com a adimensionalização dos dados do ensaio 08, através da comparação direta dos resultados.

a) Célula 01 – O valor relativo registrado pela célula de carga instalada na posição 01 devido à presença da camada flexível foi 0,36. Significa dizer que a redução das tensões aplicadas foi de 64%. Se comparados ao ensaio 05 os valores de tensão foram mantidos.

b) Célula 02 – O valor da tensão relativa registrada nesta posição foi de 1,05 em relação ao ensaio de referência. A tabela 4.5 apresenta uma comparação entre os registros relativos do ensaio 08 com os registros relativos do ensaio 05. Nela observamos que o nível de tensão no solo cresceu 71%.

c) Célula 03 – O nível dos valores de tensões adimensionalizadas produzidas neste ensaio foi de 0,94. Isto significa que houve uma redução de 6% entre o valor de tensão aplicado no ensaio de referência e este ensaio. Procurou-se avaliar também a evolução das tensões entre os ensaios 05 e 08, produzidos pela diminuição da camada flexível. Na tabela 4.5 são apresentados os valores de tensões relativas ao ensaio de referência dos ensaios 05 e 08, onde se observa que o nível de tensões reduziu de 1,06 para 0,94.

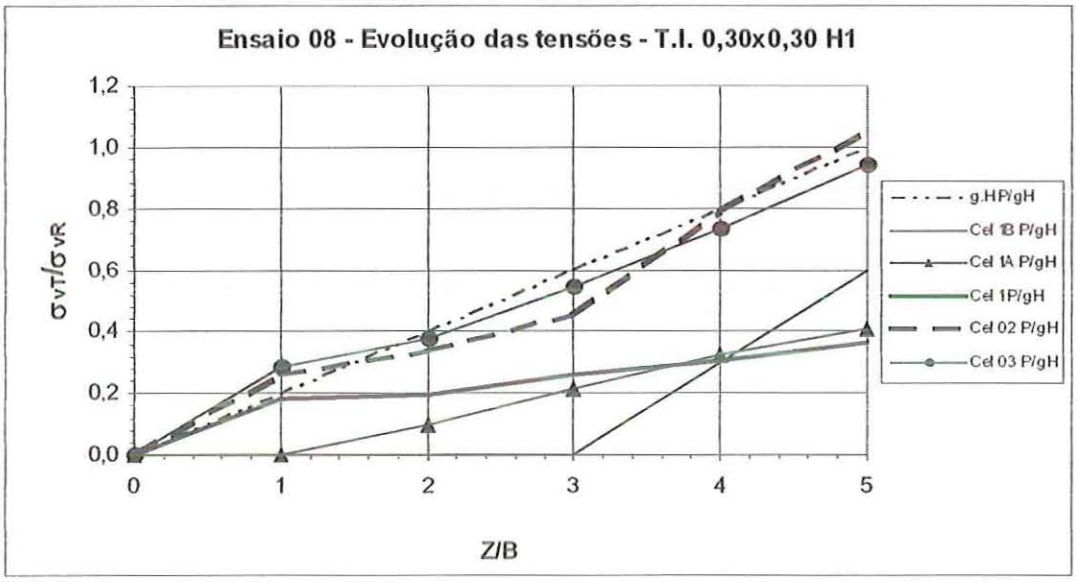


Fig. 4.29 – Ensaio 08 – Adimensionalização dos dados em função de H/B x $\sigma_v/\gamma H$

d) Célula 1A – A relação entre os valores de tensão aplicada, lidos no ensaio de referência e tensões registradas neste ensaio é de 0,41, com um alívio de tensões da ordem de 59%. A avaliação entre as tensões registradas aqui e no ensaio 05 mostra que houve um incremento de 99,6%.

e) Célula 1B – O gráfico da figura 4.29 mostra que foi registrado uma tensão de 0,60 o que significa que a presença de camada flexível produziu um alívio de 40%. A tabela 4.5 traz os registros comparativos entre os ensaio 08 e 05, onde podemos constatar um aumento do nível das tensões em 100%.

Ensaios	Referência	Cel 1B	Cel 1A	**Cel 1**	Cel 02	Cel 03
Unid.	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}	$\boldsymbol{\sigma_{vT}/\sigma_{vR}}$	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}
5	1	0.300	0.203	**0.363**	0.615	1.060
8	1	0.600	0.405	**0.363**	1.052	0.943
σ_{v5}/σ_{v5}	1	2.000	1.996	**1.000**	1.710	0.889

De um modo geral constata-se que na medida em que a dimensão da camada flexível diminui as tensões localizadas no plano do fundo da caixa tendem a crescer na região mais próxima ao centro [célula 01] enquanto as regiões mais afastadas percebem um alívio das tensões.

No plano vertical as tensões tiveram um crescimento nas duas regiões observadas.

4.4.4.2 Tensões teóricas x tensões registradas

A avaliação das tensões teóricas em relação aos valores registrados pode ser feita tomando por base o gráfico apresentado a seguir, na figura 4.30.

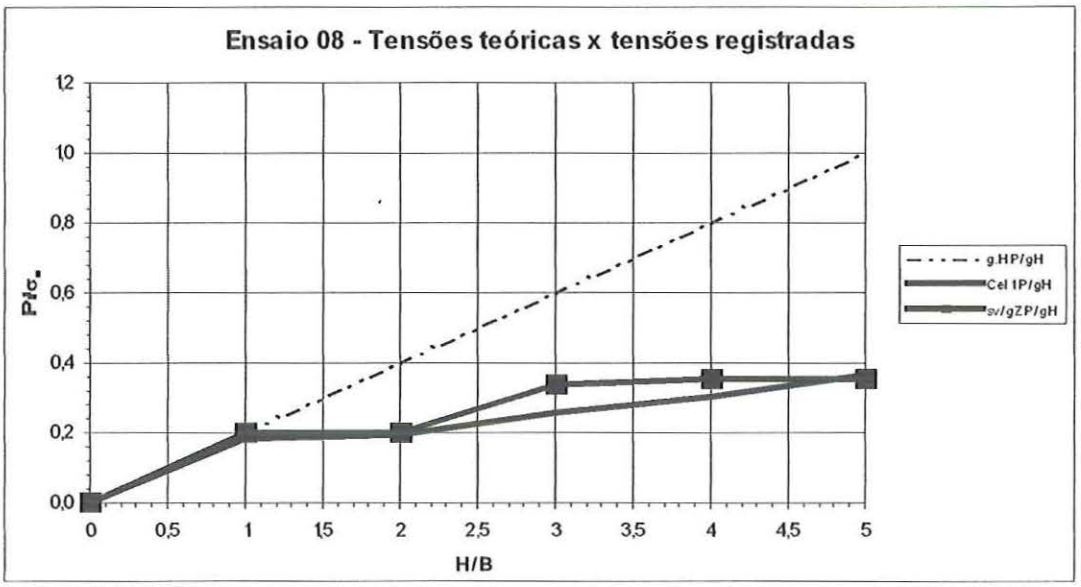


Fig.4.30 – Ensaio 08 – Avaliação das tensões teóricas x tensões registradas.

Verifica-se que a relação de tensão teórica coincide com o valor registrado e correspondem a 0,36 demonstrando um acerto na previsão dos valores de tensões. Entretanto constata-se a tendência da linha das tensões registradas ter um crescimento maior que os valores de tensões teóricas e portanto a medida em que a profundidade de recobrimento cresce o desvio entre as curvas deve se acentuar.

4.5 Análise conjunta

4.5.1 Ensaios da série A.

O grupo de ensaios da série A é composto basicamente por todos os ensaios onde as devidas camadas flexíveis foram montadas diretamente sobre o fundo da caixa de reação, mais precisamente no eixo central coincidente com a posição da célula de carga número 01. As dimensões destas camadas estão indicadas na coluna identificada por Camada Flexível *h/B* e *b/B* sendo ainda indicado que sua posição relativa *H/B* é nula.

Tabela 4.6 – Resumo das tensões dos ensaios da série A.

Ensaios	Cel 1B	Cel 1A	**Cel 1**	Cel 02	Cel 03	Camada Flexível	
Unid.	kPa	kPa	**kPa**	kPa	kPa	h/B x b/B	H/B
Ensaio de referência	8.10	13.41	**11.42**	9.80	8.95	0 x 0	0
Ensaio 1	6.28	2.54	**2.94**	9.34	12.45	1 x 1	0
Ensaio 2	7.09	3.99	**2.94**	12.26	10.13	0,75 x 0,75	0
Ensaio 3	8.10	3.08	**1.56**	7.98	8.02	0,50 x 0,50	0
Ensaio 4	8.7	5.98	**2.61**	8.37	9.92	0,30 x 0,30	0

Na Tabela 4.6 pode ser observado o resumo dos valores de tensão registrados nos ensaios série A e no ensaio de referência.

Os valores assim resumidos foram adimensionalizados e lançados em gráficos, divididos em dois grupos:

- Registros no plano vertical, passando pelo centro da caixa de reação.
- Registros no plano coincidente com o fundo da caixa.

O gráfico apresentado na fig 4.31 foi construído com os registros de valores já adimensionalizados referentes às células de carga pertencentes ao plano vertical que passa pelo eixo central da caixa de reação.

Foi traçada uma linha de tendência para cada seqüência de leituras para cada célula, de maneira que permita analisar o conjunto de pontos que representa.

Embora já analisado os diversos pontos individualmente a interpretação do conjunto permite uma melhor compreensão do que pode representar as alterações das dimensões das camadas de indução.

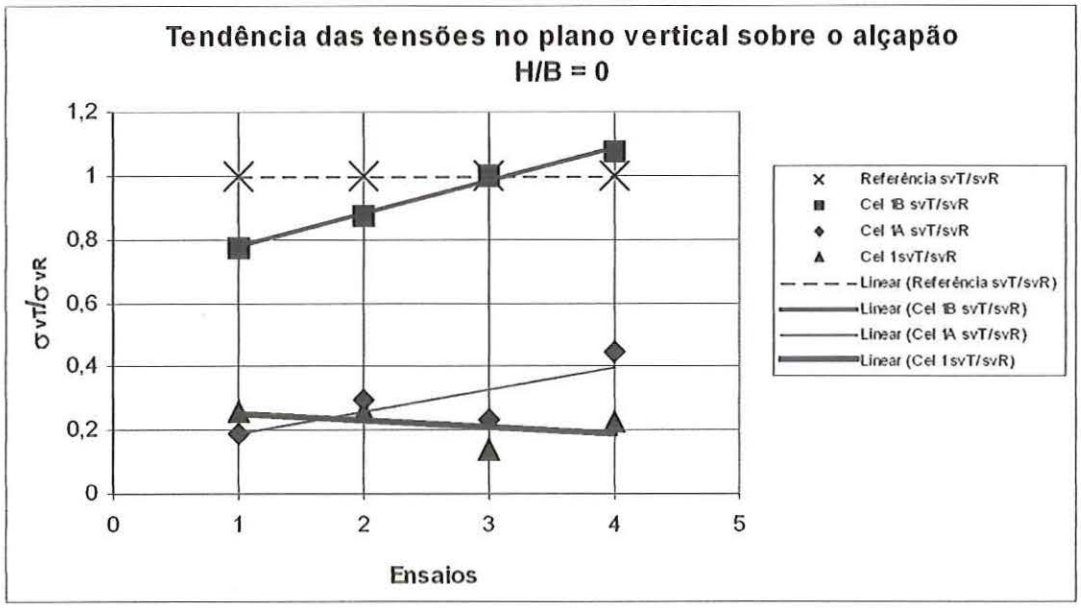


Fig. 4.31 – Tendência das tensões atuantes no plano vertical sobre o alçapão *H/B=0*

Na evolução das leituras registradas pela célula de número 01, observa-se a tendência de uma leve redução das tensões que atuam sobre ela à medida que a dimensão da camada flexível é reduzida.

Analisando a equação (4.2), pode-se compreender melhor este fato.

$$\sigma_v = \frac{B_c.\gamma}{2.k_r.\tan\phi}.\left[1 - e^{-k_r.\tan\phi.\frac{2.H}{B_c}}\right] + q.e^{\left(-k_r.\tan\phi.\frac{2.H}{B_c}\right)} \tag{4.2}$$

$$x = k_r.\tan\phi.\frac{2.H}{B_c} \tag{4.3}$$

Nas equações (4.2) e (4.3), o parâmetro B_c representa a largura da camada indutora.

Para entender como a largura B_c afeta as tensões σ_v que atuam sobre o tubo hipotético e facilitar a análise, pode-se desprezar a última parcela da equação (4.2), referente à aplicação de cargas externa, pois nos ensaios realizados não foram aplicadas nenhuma sobrecarga e por conseguinte não há prejuízo para a analise ao

fazer esta consideração e então concentrar todo o esforço de entendimento nos outros dois termos da mesma equação.

O parâmetro correspondente à largura da trincheira B_c participa nos dois termos da equação (4.2), como numerador da fração do primeiro termo e como denominador na parte exponencial que compõem o segundo terno.

Ao analisar o termo exponencial, aqui denominado por x, que assume a forma da equação (4.3), constata-se que quando o valor de B_c diminui, a tendência da fração é crescer.

Então:

$$\uparrow x = cte.\frac{H}{\downarrow B_c} \tag{4.4}$$

Se o valor de x é inversamente proporcional à largura B_c, o fato de ter sinal negativo gera uma segunda fração com o algarismo Neperiano no denominador.

"O exponencial negativo para x implica no arqueamento ativo, decorrente da" abertura do alçapão "para baixo ou de um movimento equivalente de deflexão da geratriz superior de um tubo flexível enterrado. Se o movimento do alçapão for para cima, há uma tendência de comprimir o solo do recobrimento, gerando um arqueamento passivo. Uma estrutura mais rígida que o solo envolvente também gera um arqueamento passivo. Neste caso há uma troca de sinal do índice x, que passa a ser positivo" (BULSON, 1985, p. 9).

Se o valor de e^{x} cresce, a fração tende a se anular,

$$\lim_{x \to \infty} e^{-x} = \frac{1}{\uparrow e^{\uparrow x}} \to 0 \tag{4.5}$$

Assim, o valor de Bc também participa do primeiro termo, da equação (4.2), no numerador da fração. Quando o valor de Bc diminui a fração também diminui e deve-se ainda subtrair a parcela formada pela fração de e^{-x}.

Obtém-se:

$$\downarrow \sigma_v = \frac{\downarrow B_c}{Cte}\left[1 - e^{-x}_{\to 0}\right] \tag{4.6}$$

Deste modo há à medida que as dimensões da camada flexível diminuem há uma tendência da aplicação da equação (4.1) produzir uma estimativa muito otimista.. Entretanto esta equação não permite uma analise quanto à variação da espessura desta mesma camada de indução.

Intuitivamente pode-se dizer que ao diminuir a espessura, também deverá diminuir a capacidade da camada indutora promover o arqueamento do solo, pois há uma menor camada de palha, e portanto uma menor capacidade de deformação.

Deve haver um ponto de equilíbrio, ainda a ser determinado, para que se encontre a relação ótima entre *h/B* e *b/B* da camada flexível frente à relação de *Z/B*.

É interessante notar que para as duas células imediatamente acima, ou seja, Cel 1A e Cel 1B, as tensões tendem a aumentar. O segundo gráfico apresentado na figura 4.32 mostra a tendência das tensões adjacentes registradas pelas células de tensão total posicionadas no fundo da caixa da reação.

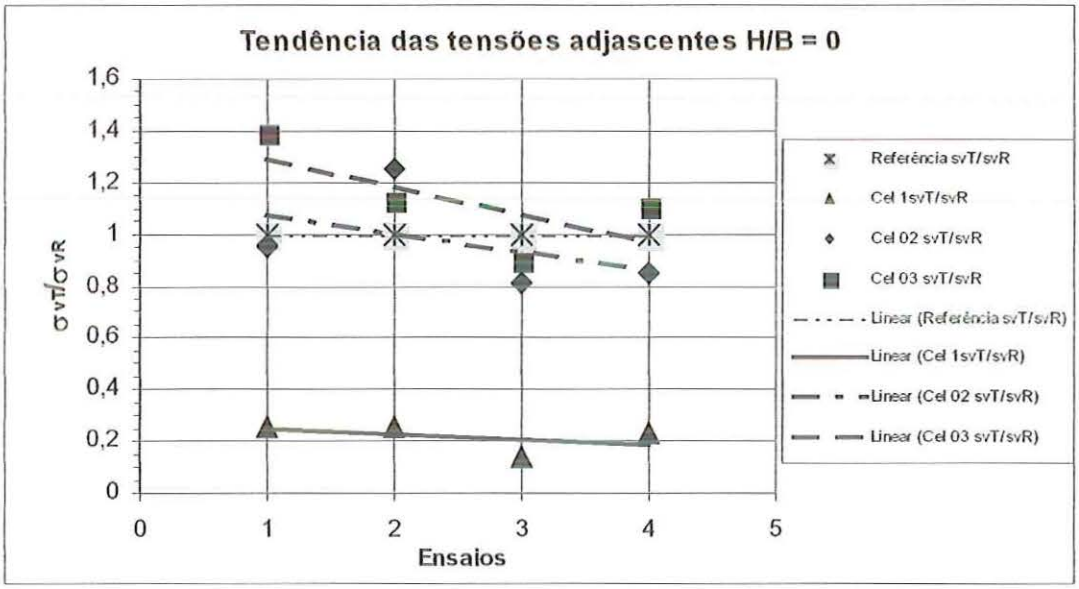


Fig. 4.32 – Tendência das tensões atuantes no plano do fundo da caixa H/B=0

De uma maneira geral demonstram uma tendência dos valores de tensão diminuírem com a redução do tamanho das trincheiras.

Pode ser dito que à medida que a largura da trincheira diminui também diminui a massa de solo que compõem o prisma interno e conseqüentemente reduz as cargas a serem distribuídas entre as colunas laterais, ou seja, reduz as tensões atuantes sobre os prismas externos. Com base no exposto observa-se que o grau de compacidade relativa que influi diretamente na densidade é muito importante. Quanto maior a compacidade relativa maior será a carga vertical.

4.5.1.1 Tensões teóricas x tensões registradas

A figura 4.33 mostra os resultados registrados nos ensaios da série "A" versus os valores teóricos obtidos, que transmitem uma idéia de tendência. Verifica-se que os valores teóricos ficaram acima dos valores registrado nos ensaios 1,2 e 3 e há uma inversão no último ponto. É preocupante o fato das linhas de tendências não seguirem paralelas.

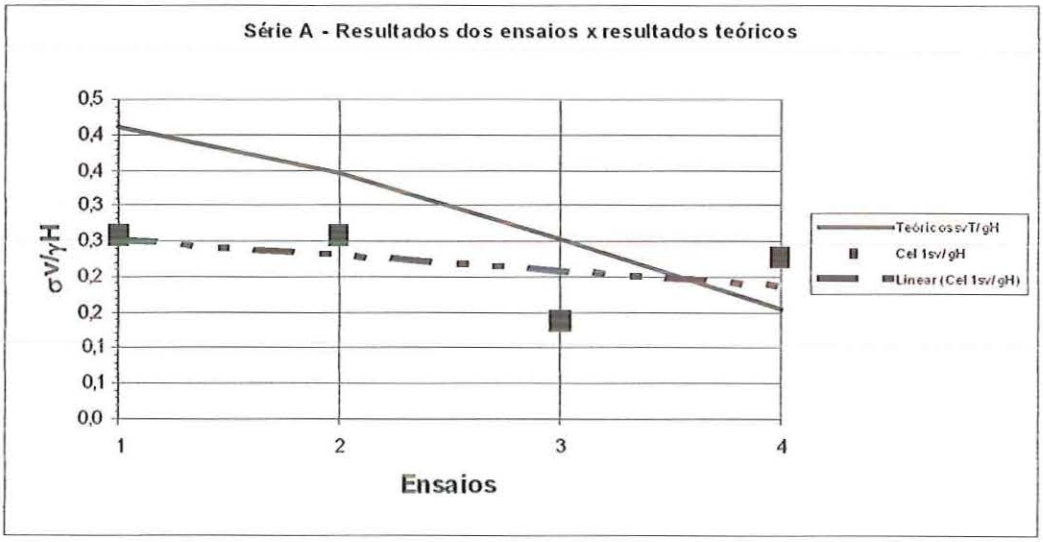


Fig. 4.33 – Série A – Resultados dos ensaios x resultados teóricos.

Para os ensaios da serie "A" onde na prática as camadas flexíveis são instaladas diretamente sobre a coroa do tubo ou conduto as tensões de uma maneira geral são responsáveis por manter a integridade do sistema de união por junta elástica.

O atrito entre a superfície do tubo com o solo é um fator importante para que a união deslizante tipo ponta-bolsa-anel não se desfaça ou venha a comprometer a estanqueidade da tubulação.

Um segundo ponto a ser considerado é que estando a camada flexível instalada diretamente sobre a coroa do tubo, este ao receber uma pressão lateral excessiva do solo, o tubo ou conduto tende a se ovalizar negativamente aumentando o diâmetro vertical durante as fases de compactação e carregamento.

Portanto recomenda-se a manutenção de um nível de tensões satisfatório acima da coroa do tubo de maneira que se garanta a integridade do sistema de união e ao mesmo tempo não gere uma ovalização excessiva do conduto. O modo de se obter o nível adequado de tensões é deixando o tubo com um envoltório primário com uma altura mínima de *1B* ou *1D*.

O terceiro ponto que pode causar transtornos é o problema de flutuação de tubulações instaladas em locais com lençol freático elevado. O empuxo que atua externamente sobre um conduto vazio pode provocar o deslocamento vertical do mesmo comprometendo a estanqueidade do sistema de união e conseqüentemente a instalação.

4.5.2 Ensaio da série B

Na tabela 4.7 observa-se a configuração com que cada ensaio foi realizado e o resumo final dos registros verificados em cada um dos mesmos.

Tabela 4.7 – Analise conjunta dos ensaios 05 a 08 incluindo o ensaio de referência.

Ensaios	Cel 1B	Cel 1A	**Cel 1**	Cel 02	Cel 03	Camada Flexível	
	KPa	kPa	**kPa**	kPa	kPa	h/B x b/B	H/B
de referencia	8.10	13.41	**11.42**	9.80	8.95	0 x 0	0
5	2.43	2.72	**4.15**	6.03	9.49	1 X 1	1
6	4.66	4.35	**6.40**	7.59	9.49	0,75 X 0,75	1
7	3.64	3.08	**6.40**	5.25	9.92	0,50 X 0,50	1
8	4.86	5.43	**4.15**	10.31	8.44	0,30 X 0,30	1

Com objetivo de resumir a analise e tirar uma conclusão foi elaborado a tabela (4.8) com os dados relativos adimensionalizados já condensados.

Tabela 4.8 - Resumo das tensões relativas dos ensaios de 05 a 08.

Tensões relativas entre os ensaios de 5 à 8 para posição da Camada Flexível H/B = 1						
Ensaios	Referência	Cel 1B	Cel 1A	**Cel 1**	Cel 02	Cel 03
	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}	σ_{vT}/σ_{vR}
5	1	0.300	0.203	**0.363**	0.615	1.060
6	1	0.575	0.324	**0.560**	0.774	1.060
7	1	0.449	0.230	**0.560**	0.536	1.108
8	1	0.600	0.405	**0.363**	1.052	0.943

Este grupo de ensaios é composto por todos os ensaios da série B onde as camadas flexíveis foram montadas sobre uma camada básica de areia a 10 cm acima do fundo da caixa de reação. As dimensões relativas destas camadas estão indicadas na coluna identificada por "Camada Flexível" "*h/B*" e "*b/B*", sendo ainda indicado que sua posição relativa tem relação "*H/B* = 1".

A analise das tensões desenvolvidas na posição correspondente à instalação da célula 01 mostra que a tendência da tensão atuante é permanecer constante em detrimento da diminuição das dimensões da camada flexível. Deste modo o melhor custo benefício pode ser atribuído à configuração de número 08.

Outra conclusão importante é que a camada flexível depende muito de seu módulo elástico volumétrico sendo que a maneira como trabalha é bem distinta de um tubo flexível. Enquanto o tubo de achata, ou seja, ele se ovaliza reduzindo o diâmetro vertical aliviando as tensões verticais que atuam sobre ele e em decorrência disto verifica-se um aumento do diâmetro horizontal contra o solo que por sua vez responde com uma pressão passiva. A camada flexível comporta-se reduzindo a dimensão vertical da altura e possivelmente mantendo a dimensão horizontal ou até mesmo sofrendo uma pequena redução desta dimensão, aliviando as tensões circunvizinhas no solo.

Esta característica de comportamento da camada flexível pode ser notada nos valores de tensões apresentados na tabela 4.8. A figura 4.34 – Ensaios 5 a 8 – Constata-se que as tensões sobre a célula de carga 01 tiveram a tendência de permanecer constantes enquanto que as tensões adjacentes tenderam a se aproximar da célula 01 à medida que a dimensão da camada flexível diminuiu.

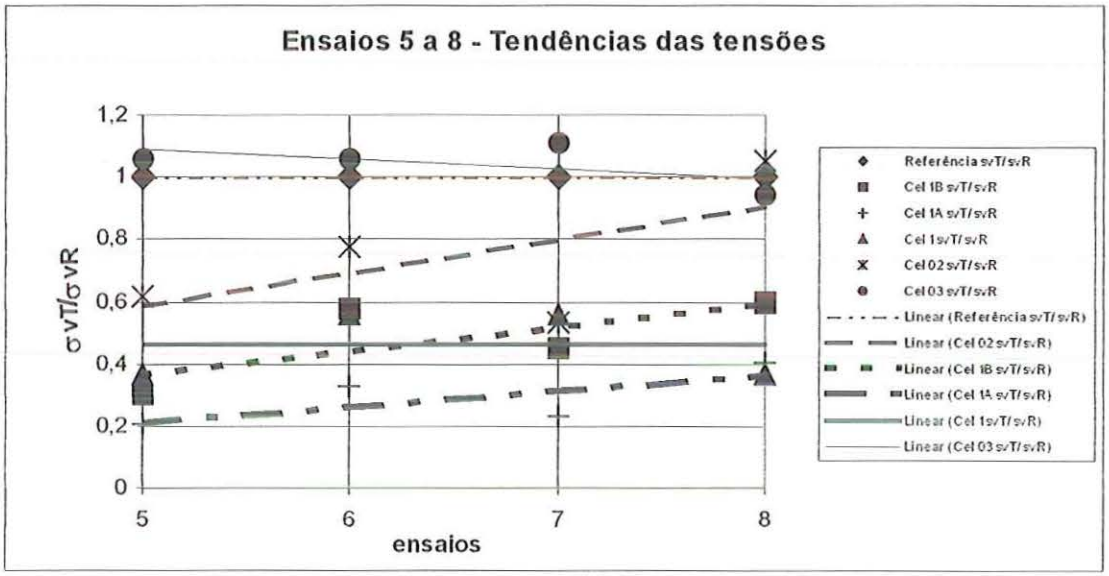


Fig. 4.34 – Ensaio 5 a 8 - Tendência das tensões.

Observando-se o comportamento das tensões registradas pela célula 02 nota-se uma discrepância no último registro que "puxa" a linha de tendência para cima.

Comparando-se as linhas de tendência obtidas através dos registros da célula 02 dos gráficos das figuras 4.34 e 4.32, fica evidente que a discrepância que produziu a mudança na segunda linha de tendência analisada situa-se no último registro.

Entretanto se o último registro for desconsiderado ambas linhas de tendência seguem uma trajetória aproximadamente paralela.

O motivo do comportamento descrito é a redução das dimensões da camada flexível e o seu afastamento do fundo da caixa de reação, com a inclusão de uma camada de areia entre a palha e o fundo da caixa. A camada de areia passa a funcionar como um "filtro" que reduz os efeitos da presença da trincheira induzida.

4.5.2.1 Tensões teóricas x tensões registradas

A figura 4.35 traz um gráfico que mostra o resultado da aplicação da equação 4.1 versus os valores registrados pela célula de carga 01, localizada no centro da caixa de reação e coincidente com o plano do fundo desta.

Os valores teóricos estão representados pela curva contínua cheia, enquanto que os valores registrados pela célula 10 estão representados por pontos por onde foi traçada uma linha de tendência.

Observa-se que à medida que a camada flexível diminui há uma tendência da aplicação da equação 4.1 produzir uma estimativa muito otimista para os valores das tensões verticais. Deste modo as tensões previstas ficam aquém das tensões efetivamente registradas.

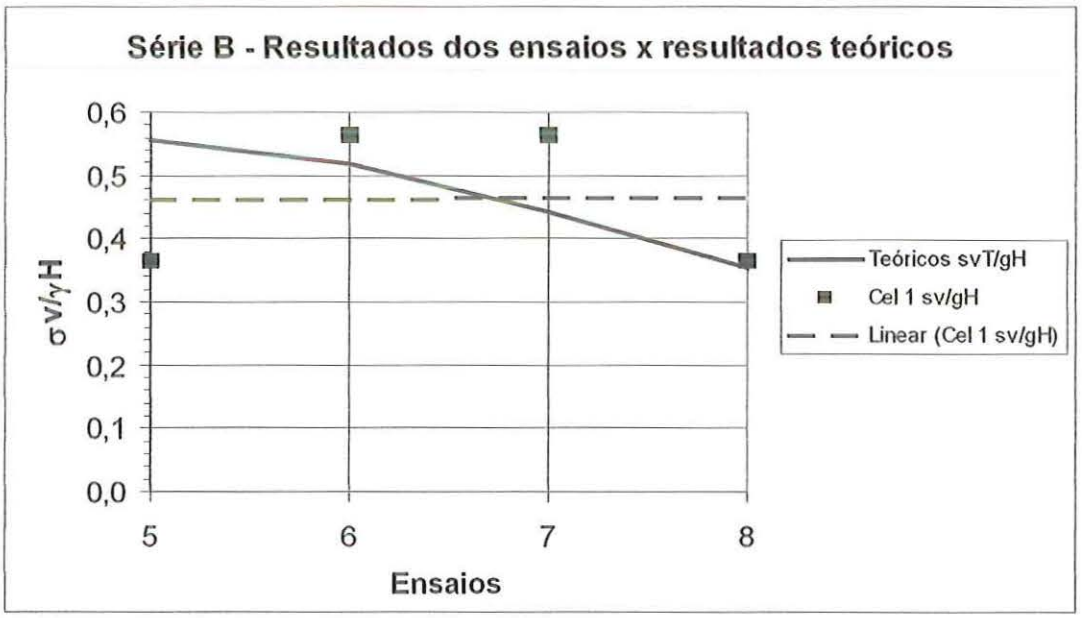


Fig. 4.35 – Série B – Analise conjunta dos dados teóricos x registros dos ensaios

4.5.3 Considerações práticas

Tanto os ensaios da série A onde a camada flexível é posicionada diretamente no fundo da caixa de reação, como também os ensaios da série B onde a camada flexível se posiciona a uma distância de 1B acima do fundo da caixa de reação, foram realizados em laboratório e, portanto sua aplicação prática deve diferir um pouco do que vemos nesta dissertação, isto é, sempre exigirá alguns ajustes.

4.5.3.1 Para a série A

Nos ensaios da *série A*, a camada flexível foi disposta exatamente sobre a coroa do tubo não havendo diferença entre o laboratório e a prática de campo.

A aplicação prática da técnica da trincheira induzida exige uma reflexão sobre como o trabalho de campo deve ser executado. Na seqüência da execução do trabalho de instalação do tubo, existe uma divisão importante a ser considerada. Após a execução do assentamento ou lançamento do tubo é realizado o envolvimento primário, que consiste da primeira camada de solo que envolve diretamente o tubo. Esta camada é composta de um berço ou fundação, dos dois prismas laterais, que se erguem até o nível da geratriz superior do tubo e de um pequeno recobrimento acima da coroa deste. Freqüentemente, nesta primeira fase é utilizado areia lavada. A partir daí, o critério de execução pode diferir muito. O que se recomenda é que seja construído um molde, com as dimensões definidas da camada flexível. As paredes laterais do molde devem ser levemente inclinadas para fora e facilmente desmontáveis, de modo a facilitar sua remoção futura.

É então dada seqüência à instalação substituindo a areia, se for o caso, pelo solo natural, fazendo-se a compactação dos prismas laterais em camadas, que por sua vez, podem variar sua espessura em função do tipo e peso de equipamento de compactação utilizado. Esta compactação deve ser controlada, com pelo menos 90% do Próctor padrão. Os moldes, ao serem removidos, deixam um espaço vazio que deve ser completado com palha ou um material flexível adequado.

A principal diferença para o laboratório reside no fato de que o trabalho de compactação, da primeira camada de solo acima da camada flexível, é feito com maior ênfase nas laterais de trincheira, diminuindo a intensidade da compactação em direção ao centro da vala, sendo que exatamente no centro da vala o solo é apenas pisado ou compactado moderadamente à mão. Este procedimento segue até que se ultrapasse *1D* acima do nível superior da camada flexível. Nas camadas que se sucedem, o trabalho de compactação do centro da trincheira passa a ser executado pelo equipamento, inicialmente com menor grau de compactação e depois de uma camada de espessura superior *2D*, acima da camada flexível, o trabalho de compactação no centro da vala passa a ter o mesmo tratamento das laterais. Entre *1D* e *2D* o que se pretende fazer é um trabalho de transição de uma compactação.

4.5.3.2 Para a série B

Particularmente os ensaios da *série B*, onde a trincheira indutora está posicionada a uma distância vertical de *1B* do fundo da caixa, foi realizada, na caixa de reação, com aplicação do mesmo grau de adensamento da areia aplicado nas demais camadas. Isto porque a técnica de chuva de areia não é seletiva e o adensamento é realizado indistintamente sobre todas as regiões, prismas externo e interno.

Na instalação de um tubo flexível em uma obra, dificilmente se faz a compactação da primeira camada diretamente acima do tubo. Usualmente, durante a instalação do tubo, com o envoltório primário feito com areia lavada, o que se poderia conseguir é que se molhe generosamente a areia na tentativa de se obter um melhor grau de adensamento. Já na seqüência de execução, o recobrimento secundário é executado com o reaproveitamento do solo natural, o trabalho de compactação é realizado primeiramente nas colunas laterais de solo, enquanto que no prisma central, o solo é apenas pisado ou levemente compactado manualmente, para que não fiquem falhas, conforme já detalhado no procedimento da série A.

Capítulo 5

Conclusões

A partir dos dados e registros dos ensaios, das observações feitas durante a realização dos mesmos e das analises dos dados experimentais apresentados neste trabalho pode-se concluir que:

a. A camada indutora é um instrumento muito eficiente que permite induzir o arqueamento do solo e modificar significativamente as distribuições de tensões, reduzindo os esforços atuantes sobre os tubos enterrados.

b. Pode-se utilizar materiais baratos como, por exemplo, à palha de arroz ou outro material flexível qualquer, encontrado com uma certa facilidade ao longo de uma obra.

c. A eficiência obtida nas duas séries ensaios realizados neste trabalho com a aplicação da técnica da trincheira induzida na redução de tensões, situa-se entre 44% e 86%. Os ensaios da série A tiveram resultados melhores que os ensaios da série B.

d. O comportamento e o nível de eficiência obtida nos ensaios aqui realizados é igual ou superior aos relatos históricos. Talvez isto possa ser justificado pelo fato de se trabalhar com analise em curto prazo. Embora tenha sido utilizado areia para realização dos ensaios e se espere que o comportamento desta fique estável ao longo do tempo. Já

a palha de arroz que é o material utilizado para montagem da camada flexível poderá sofrer alterações em seu comportamento devido à degradação.

e. A decisão de instalar a camada indutora diretamente acima do conduto (instalação A) ou a uma distância *D* acima deste (instalação B) foi discutida no capítulo 4.4 e 4.5 e deve ser tomada com base nas características particulares de cada obra. Somente a partir daí é que deve-se optar pela melhor configuração. De maneira geral as melhores configurações de trincheira são a de número 04 (instalação A) e a número 08 (instalação B).

f. Há a necessidade de se estudar um ajuste na equação (4.1) aplicada para obter uma melhor aproximação de projeto como demonstrado na analise conjunta capitulo 4.5. Constata-se que a curva que representa os valores teóricos não segue paralela a curva dos valores registrados, divergindo muito das condições práticas. À medida que as dimensões da camada flexível diminuem há uma tendência da aplicação da equação (4.1) produzir uma estimativa muito otimista. A impossibilidade de se ter uma formulação mais exata gera desconfianças por parte de projetistas e usuários que acabam por não adotar a técnica da trincheira induzida e optam por técnicas convencionais. Se corretamente aplicada à técnica da trincheira induzida pode trazer significativos benefícios econômicos para a obra.

g. O ângulo de atrito interno do solo causa somente uma pequena influência no resultado prático para a aplicação da falsa trincheira. Entretanto a variação da densidade pode causar mudanças significativas no valor das tensões verticais.

h. Os resultados dos registros dos ensaios mostram que a redução das dimensões, largura e altura, da camada flexível não tiveram grandes

reduções de eficiência, nos ensaios realizados. Esta constatação pode ser feita pela observação do comportamento dos valores registrados pela célula 01 nos ensaios das séries A e B. Entretanto a análise da equação (4.1) apresentada no capítulo 4.5.1 demonstra que a largura tem influência e deveria produzir a redução do valor das tensões verticais, contrariando os registros práticos. A equação (4.1) não oferece condição adequada para a análise do efeito causado pela redução da altura da camada indutora, ficando implícito que a mesma é capaz de se deformar o suficiente e mobilizar toda capacidade de arqueamento do solo. Este fato também demonstra que há necessidade de se adequar à equação para que se possa fazer uma análise mais precisa.

i. Nos ensaios realizados observou-se um comportamento da camada flexível diferente dos condutos flexíveis. Um conduto flexível ao receber uma carga vertical sofre uma deformação vertical se "achatando" e aumentando o diâmetro horizontal, ou seja, embora deformado o conduto mantém a área de sua seção transversal constante. A camada flexível ao se submeter à ação de uma carga vertical experimenta uma redução de sua dimensão vertical sem aumentar sua dimensão horizontal, observando-se uma redução da área de sua seção transversal, promovendo assim uma redução de tensões adjacentes mais próximas. Comportando-se deste modo, a camada flexível promove uma distribuição de tensões por uma área de solo bem maior que o teoricamente esperado, reduzindo de maneira geral o nível de tensão.

Capítulo 6

Sugestões

6.1 Introdução

As observações feitas para a realização dos ensaios têm o intuito de trazer uma contribuição com as futuras atividades de pesquisa tornando-as mais proveitosas.

6.2 Quanto à instalação da camada flexível.

a) Os ensaios foram realizados para uma profundidade de instalação constante, para $Z/B = 5$ nos ensaios da série A e $Z/B = 4$ nos ensaios da série B. Sugere-se verificar outras relações de profundidade, tanto maiores quanto menores.
b) Avaliar a eficácia da aplicação da camada flexível com baixos recobrimentos e presença de cargas dinâmicas.
c) Verificar o comportamento da instalação quando submetida à aplicação de cargas externas de diferentes naturezas:
   a. Cargas uniformemente distribuídas,
   b. Cargas concentradas,
   c. Cargas dinâmicas.
d) Ensaiar uma instalação em verdadeira grandeza, analisando o comportamento do sistema em longo prazo.
e) Verificar a possibilidade de ajuste matemático da equação (4.1) de modo a permitir a previsão de resultados mais precisos.

f) Ensaiar diversas dimensões para camada flexível, primeiramente fixando-se a largura e variando-se a altura e depois fazendo o inverso, fixando-se a altura e variando-se a largura e procurar ainda manter as duas séries de ensaios.

g) Verificar o efeito da coesão sobre o desempenho da aplicação da trincheira induzida. A coesão, encontrada em solo traz um efeito benéfico na aplicação da técnica da trincheira induzida. Em ensaios preliminares realizados com o solo "Linhão do Broa" demonstram os possíveis benefícios auferidos pela presença da coesão.

h) Ensaiar a combinação de camadas flexíveis instaladas em série. Esta combinação pode ser adequada para elevadas profundidades de instalação dos condutos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WATER WORK ASSOSSIATION (1996) - AWWA C950. Fiberglass Pressure Pipe.

ASSOSSIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (1984). ABNT NBR 6508 – Grãos que Passam na Peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica.

ASSOSSIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (1990). ABNT MB-3388 – Determinação do Índice de Vazios Mínimo de Solos Não Coesivos.

ASSOSSIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, (1990). ABNT NB-3324 – Determinação do Índice de Vazios Máximo de Solos Não Coesivos.

BUENO, B. S.; VILAR, O.M. (1999). Mecânica dos Solos – vol. I. São Carlos, EESC-USP.

BUENO, B.S. (1991). Previsão da carga de ruptura de condutos enterrados através da curva carga x deflexão de campo. Lisboa, Geotecnia, vol. 63, pp 27-38.

BULSON, P.S. (1985). Buried Structures, Static and Strength. New York, Chapman and Hall.

CARVALHO, A. (1992). Fiberglass x Corrosão. São Paulo, ASPLAR.

GUMBEL, J.E.; O'REILLY, M.P.; CARDER, D.R. (1982). Development of a New Desing Method for Buried Flexible Pipes. In: Proccedings Europipe, apud VIANA & BUENO (1998).

HACHICH, W. (1999). Fundações: Teoria e Prática. São Paulo, 2ª edição. Editora Pini Ltda. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA & ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE FUNDAÇÕES E GEOTECNIA.

JANSEN, H.A. (1895). Versuche Ueber Getreidedruck in Silizellen. ZVer. Deut. Ingr., 39, 1045. apud KELLOG (1985); OSWELL & SLANDEN (1988); BULSON (1985).

KELLOGG, C.G. (1985). The Arch in Soil Arching. A.S.C.E, (discussion), vol. 111, № 3, paper 19547.

KELLOGG, C.G. (1993). Vertical Earth Loads on Buried Engineering Works. Journal of Geotecnical Engineering, v119, № 03, p487-506.

KLOEPPEL, K.; GLOCK, D. (1970). Theoretische und Experimentelle Untersuchungen zu den Tragastproblemen biegeweicher. In die Evde eigenbetten Rohre Publ. № 10, Institut fuer Statik amd Stahibau, T.H. Darmstadt, Germany, apud OKEAGU &ABDEL-SAYED (1984).

KRIZEK , R.J.; PARMELEE, R.A.; KAY, J.N.; ELNAGAAR, H.H. (1971). Strucutral Analysis and Design of Pipe Culvert. Washington, apud VIANA & BUENO (1998).

LINSLEY, R. K.; FRANZINI, J.B. (1978). Engenharia de Recursos Hídricos. Trad. Por PASTORINO, L.A. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo; Editora MacGraw-Hill do Brasil, Ltda.

LUSCHER, U. (1966). Bucling of Soil-Surrounded Tubes. J. Soil Mesch. Found. Div, ASCE, v. 92, N.SM6, p.211. apud VIANA & BUENO (1998).

MACNULTY, J.W. (1965). An Experimental Study of Arching in Sand. US Waterways Experimental Station, Tech. Rep. 1-674 apud BULSON, P.S. (1985).

MARSTON, A.; ANDERSON, A.O. (1913). Iowa Engineering Experiment station. Bull № 31 apud BULSON, P.S. (1985).

MEYERHOIF, G.G & BAIKIE, L.D. (1963). Strength of Steel Culvert Sheets Bearing Against Compacted Sand Backfill. 42nd Annual Meeting, Higway Research Board. Highw. Res. Rec. № 30. apud OKEAGU & ABDEL-SAYED (1984).

NOGUEIRA, J.B. (1998). Mecânica dos Solos: Ensaios de Laboratório. São Carlos. EESC-USP.

OKEAGU, B.; ABDEL-SAYED, G. (1984). Coefficients of Soil Reaction for Buried Flexible Conduits. Journal of Geotechnical Engineering. V. 110, № 07, p. 908-922.

RANKINI, W.J.M. (1862). Manual of Civil Engineering. Inglaterra, apud BULSON, P.S. (1985).

SLANDEN, J.A.; OSWELL, J.M. (1988). The Induced Trench Method – A Critical Review and Case History. Can Geotech.j., v.25, p541 – 549.

SPANGLER, M.G. (1950). A Theory of Loads on Negative Proceding Conduits. Prc. US Highway Res. Board, 30, 153 apud TROTT & YOUNG (1984).

SPANGLER, M.G. (1951). Soil Enginnering. Ames, Iowa, E.U.A., International Textbook Company, apud VIANA & BUENO (1998).

SPANGLER, M.G.(1968). Discussion of the Modification of the Pressures on Rigid Culverts With Fill Procedures. Highway Research Record, №249; 41-43, apud OSWELL & SLADEN (1988).

TERZAGHI, K.V.(1936). Stress Distribution in Dry and Saturated Sand Above a Yieldind in Vienna. n.Z-3, apud OKEAGU & ABDEL-SAYED(1984).

VARGAS, M. (1978). Introdução à Mecânica dos Solos. São Paul, Editora McGraw-Hill Ltda.

VIANA, P.M.F.; BUENO, B.S. (1998). Condutos Enterrados: Redução de Esforços Sobre a Estrutura. São Carlos, EESC-USP.

YOUNG, O.C.; TROTT, J.J.(1984). Strucutral Desing of Pipelines. London and New York, Elsevier Applied Science Publishers.

ZAIDELER, W. (1983). Projetos Estruturais de Tubos Enterrados. São Paulo, Editora Pini Ltda.

OBRAS CONSULTADAS

ALGOOD, J.R. & CIANI, J.B. (1968). The influence of soil modulus on the behavior of cilindres in sand, Highway Research Record, №249, p. 1-13.

DAVIS, R.E. & BACHER (1968). California's culvert research program – Description, current status, and observed peripheral pressures. Highway Research Record, №249, p.14-23.

DEEN, R.C.(1969). Performance of a reinforced concrete pipe culvert under rock embankment, Highway Research Record, №262, p. 14-28.

Karadi, G.M. & KRIZEK, R.J.(1969).Culvert design in some European Countries, Highway Research Record, №262, p. 29-43.

KRYNINE, D. P. (1946). Transfer of earth pressures by shearing stresses. Highway Research Board, vol. 35, p.413-421.

LARSEN, N.G. (1962); A pratical Meted for constructing rigid conduits under high fills, Highway Resarch Board, Proceedings, v. 41 № 41, p.273-279.

NIELSON, F.D. (1967). Soil structure arching analysis of buried flexible structures. Highway Research Record, №185, p. 36-50.

NIELSON, F.D. (1972). Experimental studies in soil-structure interaction. Highway Research Board, HRR № 423, p. 30-44.

PARMELEE, R. A. & COROTIS, R.B. (1972). The Iowa defletion formula: An appraisal. Highway Research Board, HRR № 423, p. 89-102.

SCHILICK, W.J.(1952); Loads on negative-Projecting Conduits, Highway Research Board, Proceedings, v. 31 № 238, p. 308-319

SPANGLER, M.G. (1951); A theory on loads on negative projecting conduits, Highway Research Board, Proceedings, v. 30 p. 153-161

SPANGLER, M.G. (1958); A pratical application of the imperfect ditch method of construction, Highway Research Board, Proceedings, v. 37 № 612, p.271-277.

SPANGLER, M.G. (1972). Discussion. Highway Research Record, №443, p. 30-31.

TAYLOR, R.K. (1972). Induced trench method of culvert installation. Highway Research Record, № 443, p. 15-30.

WATKINS, R.K.(1966). Strucural design of buried circular conduits. Highway Research Record, №145, p. 1-16.