

# **O PROJECTO DE UM TÚNEL SUBMARINO PARA UM EXUTOR COM A SOLUÇÃO DE TUNELADORA COM ANÉIS DE BETÃO EMPURRADOS**

Aspectos geotécnicos e de dimensionamento

**BRUNO DANIEL PEREIRA DE OLIVEIRA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA**

---

Orientador: Professor Doutor António Manuel Barbot Campos e Matos

---

Co-Orientador: Engenheiro Mário Durão

JULHO DE 2011

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À memória da minha Avó

Olha pelos teus pensamentos, eles tornam-se palavras;  
Olha pelas tuas palavras, elas tornam-se acções;  
Olha pelas tuas acções, elas tornam-se hábitos;  
Olha pelos teus hábitos, eles tornam-se carácter;  
*Olha pelo teu carácter, ele torna-se o teu destino.*

*Frank Outlaw*





## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho, não teria sido possível sem a ajuda directa e indirecta de muitas pessoas, pelo que gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todas elas.

Agradeço a oportunidade que me foi concedida pelo meu orientador Professor António Campos e Matos, de realizar um trabalho sobre este tema, complexo mas ao mesmo tempo ambicioso. Agradeço ainda a duas pessoas que me ajudaram e me guiaram durante a execução do trabalho, sem a ajuda das quais seria uma tarefa dura de executar, sendo elas o co-orientador Eng. Mário Durão e o Eng. Paulo Pinto, ambos do GEG.

Quero agradecer em especial a toda a “família” de geotecnia, que de uma forma ou de outra esteve sempre presente nos momentos mais importantes. Em especial agradeço ao amigo Carlos Costa, pelas horas partilhadas de trabalho nas quais sempre me apoiou e me ajudou a seguir em frente.

Agradeço ainda à minha família, aos meus Pais, ao meu Irmão e aos meus Avós, por todo o apoio que sempre me deram e por me permitirem ter chegado até aqui. Em particular, agradeço mais uma vez à minha Mãe, pela ajuda na revisão ortográfica do presente trabalho.

À minha namorada, agradeço por todo o apoio prestado durante este percurso e pelas horas que abdicou da minha companhia, as quais foram canalizadas para a execução deste trabalho.



## RESUMO

O presente trabalho tem como principal objectivo o estudo dos aspectos geotécnicos para o dimensionamento de um túnel com recurso à solução de tuneladora com anéis de betão empurrados, tendo por base alguns dados de um exutor construído com a mesma técnica

Numa primeira abordagem foi explicada detalhadamente a técnica utilizada, os processos intervenientes, os seus elementos e o seu campo de aplicação.

Foi modelada uma solução com o programa Phase<sup>2</sup>, no estado plano de deformação, que foi comparada com uma solução teórica da qual se conheciam os resultados.

Para a obtenção dos parâmetros de dimensionamento, recorreu-se a um modelo axissimétrico com a introdução das características aproximadas de um exutor já construído, calculado também no programa Phase<sup>2</sup>, capaz de simular uma situação em 3 dimensões num modelo a 2 dimensões.

PALAVRAS-CHAVE: túneis, anéis de betão, *pipe jacking*, exutor, axissimétrico.



**ABSTRACT**

The present work aims to study the geotechnical issues used for a tunnel design, with concrete jacked pipes, based on data from an already built sewer, with the same technique.

A first approach, explained with detail the used technique, its processes, its elements and its scope.

Was modeled a plain strain solution on Phase<sup>2</sup>, later being compared with a theoretical solution well known.

In order to get the design parameters, was built an axisymmetric model, based on built sewer's features. This model was calculated with Phase<sup>2</sup>, taking advantage of its capability on simulates a 3 dimension scenery, with a 2 dimension prototype.

KEYWORDS: tunnels, concrete pipes, pipe jacking, sewer, axisymmetric.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 Definição do âmbito.....	1
1.2 Objectivos.....	2
1.3 Estado da arte em Portugal.....	2
1.3.1 Exutor submarino de Matosinhos .....	3
1.3.2 Aquícola de engorda de Pregado em Mira .....	4
1.4 Organização em capítulos.....	6
<b>2 DRENAGEM URBANA E ÁGUAS PLUVIAIS</b> .....	7
2.1 Uma abordagem à drenagem urbana .....	7
2.2 Águas pluviais ( <i>Stormwater</i> ) .....	8
2.3 Efeitos da urbanização na drenagem de águas pluviais .....	10
2.4 Tipos de construção de exutores .....	13
2.4.1 Construção com escavação de valas ( <i>open-trench</i> ).....	14
2.4.1.1 Escavação .....	14
2.4.2 Construção em túnel ( <i>tunnelling</i> ) .....	15
2.4.2.1 Suporte .....	15
2.4.2.2 Tratamento do solo e controlo do nível freático .....	16
2.4.2.3 Escavação .....	17
2.4.3 Construção sem abertura de valas ( <i>trenchless</i> ) .....	17
2.4.3.1 Pipe jacking .....	17
2.4.3.2 Microtúneis ( <i>microtunnelling</i> ) .....	18
2.4.3.3 <i>Thrust auger boring</i> .....	18
2.4.3.4 Furação direccionada (HDD).....	18
2.4.3.5 Perfuração por percussão ( <i>Impact moling</i> ) .....	19
2.4.3.6 <i>Pipe ramming</i> .....	19
2.4.4 Tubos utilizados nas condutas .....	20
2.4.4.1 Generalidades .....	20
2.4.4.2 Materiais .....	20
<b>3 PIPE JACKING</b> .....	23
3.1 Introdução à técnica .....	23
3.2 Elementos de <i>pipe jacking</i> .....	25
3.2.1 Face de escavação .....	25
3.2.2 Curso do túnel .....	26
3.2.2.1 Tubos a utilizar ( <i>jacking pipes</i> ).....	27
3.2.2.2 Juntas entre tubos ( <i>pipe joints</i> ) .....	30

3.2.2.3	Extensão dos trechos entre poços .....	35
3.2.2.4	Transporte do solo escavado e ligações ao escudo .....	38
3.2.3	Poço de ataque .....	42
3.2.3.1	Equipamento de empurre .....	43
3.2.3.2	Parede de reacção .....	46
3.2.3.3	Instalação dos tubos, posicionamento e monitorização .....	48
3.2.3.4	Dimensões e configuração do poço de ataque .....	53
3.2.3.5	Construção dos poços .....	54
3.2.4	Zona de equipamentos à superfície .....	60
3.2.4.1	Manuseamento dos despojos de escavação .....	61
3.2.4.2	Unidades primárias de alimentação .....	61
3.2.4.3	Manuseamento dos tubos .....	62
3.3	Investigação local e informação necessária das condições do solo .....	63
3.3.1	Estudo de secretária .....	63
3.3.2	Estudo do subsolo .....	63
3.3.2.1	Custos da investigação .....	64
3.3.2.2	Recolha de amostras e ensaios em laboratório .....	65
3.3.2.3	Recolha de amostras e ensaios <i>in situ</i> .....	66
3.3.2.4	Ensaio <i>in situ</i> .....	66
3.3.2.5	Técnicas geofísicas .....	67
3.3.2.6	Informação obtida nos ensaios .....	68
3.3.3	Investigação local .....	69
3.3.3.1	Tipos de investigação .....	69
3.3.3.2	Pontos de conflito com estruturas subterrâneas .....	70
<b>4</b>	<b>DESCRIÇÃO E MODELAÇÃO DO OBJECTO DE ESTUDO .....</b>	<b>73</b>
4.1	Descrição do objecto de estudo .....	73
4.2	Propriedades do material a atribuir ao maciço envolvente .....	73
4.3	Solução de <i>Kirsch</i> .....	76
4.4	Modelação do problema no programa Phase <sup>2</sup> .....	78
4.4.1	Apresentação do programa .....	78
4.4.2	Modelação do problema no estado plano de deformação .....	78
4.4.3	Modelação do problema com o tipo de análise axissimétrica .....	82
4.4.3.1	Definição da geometria do modelo .....	83
4.4.3.2	Faseamento construtivo para o modelo de cálculo elástico .....	89
4.4.3.3	Faseamento construtivo para o modelo de cálculo plástico .....	89
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>93</b>
5.1	Resultados obtidos pela solução de <i>Kirsch</i> .....	93
5.1.1	Resultados obtidos para tensões, pela solução de <i>Kirsch</i> .....	94
5.1.1.1	Tensões radiais e tangenciais nas direcções $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ , para $k=0$ .....	94
5.1.1.2	Tensões radiais e tangenciais nas direcções $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ , para $k=1$ .....	95



5.1.1.3	Tensões radiais e tangenciais nas direcções $\theta = 0o$ e $\theta = 90o$ , para $k=2$ .....	96
5.1.1.4	Tensões radiais e tangenciais nas direcções $\theta = 0o$ e $\theta = 90o$ , para $k=3$ .....	97
5.1.1.5	Tensões radiais e tangenciais nas direcções $\theta = 0o$ e $\theta = 90o$ , para $k=4$ .....	98
5.1.1.6	Normalização dos resultados de tensões para os vários valores de $k$ .....	99
5.1.2	Resultados obtidos para deslocamentos, pela solução de <i>Kirsch</i> .....	100
5.1.2.1	Deslocamentos radiais nas direcções $\theta = 0o$ e $\theta = 90o$ , para $k=0$ .....	101
5.1.2.2	Deslocamentos radiais nas direcções $\theta = 0o$ e $\theta = 90o$ , para $k=1$ .....	102
5.1.2.3	Deslocamentos radiais nas direcções $\theta = 0o$ e $\theta = 90o$ , para $k=2$ .....	103
5.1.2.4	Deslocamentos radiais nas direcções $\theta = 0o$ e $\theta = 90o$ , para $k=3$ .....	104
5.1.2.5	Deslocamentos radiais nas direcções $\theta = 0o$ e $\theta = 90o$ , para $k=4$ .....	105
5.1.2.6	Considerações acerca dos resultados obtidos para deslocamentos, pela solução de <i>Kirsch</i> .....	105
5.2	Resultados obtidos pela modelação no estado plano de deformação .....	106
5.2.1	Resultados obtidos para tensões, pelo modelo no estado plano de deformação .....	106
5.2.1.1	Tensões em “x” e em “y” nas direcções horizontal e vertical, para $k=0$ .....	107
5.2.1.2	Tensões em “x” e em “y” nas direcções horizontal e vertical, para $k=1$ .....	109
5.2.1.3	Tensões em “x” e em “y” nas direcções horizontal e vertical, para $k=2$ .....	111
5.2.1.4	Tensões em “x” e em “y” nas direcções horizontal e vertical, para $k=3$ .....	113
5.2.1.5	Tensões em “x” e em “y” nas direcções horizontal e vertical, para $k=4$ .....	115
5.2.2	Resultados obtidos para deslocamentos, pelo modelo no estado plano de deformação .....	117
5.2.2.1	Deslocamentos radiais ( $u_x$ e $u_y$ ) nas direcções, horizontal e vertical, para $k=0$ .....	117
5.2.2.2	Deslocamentos radiais ( $u_x$ e $u_y$ ) nas direcções, horizontal e vertical, para $k=1$ .....	119
5.2.2.3	Deslocamentos radiais ( $u_x$ e $u_y$ ) nas direcções, horizontal e vertical, para $k=2$ .....	121
5.2.2.4	Deslocamentos radiais ( $u_x$ e $u_y$ ) nas direcções, horizontal e vertical, para $k=3$ .....	123
5.2.2.5	Deslocamentos radiais ( $u_x$ e $u_y$ ) nas direcções, horizontal e vertical, para $k=4$ .....	125
5.2.3	Considerações acerca dos resultados obtidos pelo modelo no estado plano de deformação .....	127
5.3	Resultados obtidos pela modelação axissimétrica com cálculo elástico .....	128
5.3.1	Deslocamentos no plano transversal ao eixo do túnel .....	128
5.3.2	Deslocamentos de convergência ao longo da superfície do túnel .....	130
5.4	Resultados obtidos pela modelação axissimétrica com cálculo plástico .....	131
5.4.1	Deslocamentos na extremidade do tubo de betão .....	133
5.4.2	Resistência friccional entre o tubo e o maciço, promovida pelo empurre .....	134
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	<b>137</b>
6.1	Conclusões gerais .....	137
6.2	Desenvolvimentos futuros .....	138
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>139</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>143</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 - Esquema da implantação do aquícola de engorda de Pregado de Mira.....	6
Fig. 2.1 – Interfaces da drenagem urbana (Butler and Davies 2011) .....	7
Fig. 2.2 – Processo de geração de escoamento pelas águas pluviais (Butler and Davies 2011) .....	8
Fig. 2.3 – Ciclo hidrológico da água .....	9
Fig. 2.4 – Efeito da urbanização no destino das águas da chuva (Butler and Davies 2011) .....	11
Fig. 2.5 - Contraste entre os caudais de um escoamento num solo com vegetação e numa superfície impermeável (Ferguson 1998) .....	11
Fig. 2.6 - Efeito da urbanização no pico do caudal do escoamento superficial .....	12
Fig. 2.7 – Construção de um exutor com abertura de vala (Kana Pipeline 2011) .....	13
Fig. 2.8 – Interceptor de esgostos de Brighton em 1939 (SubterraneaBritannica 2008).....	14
Fig. 2.9 – Suporte primário de segmentos de betão pregados (BuchanConcreteSolutions 2011) .....	15
Fig. 2.10 – Pipe jacking (ServicesFirstLimited 2011) .....	18
Fig. 2.11 – Thrust Auger Boring (Hidrossolo 2006).....	18
Fig. 2.12 – Furação direcciona (ASTT 2010) .....	19
Fig. 2.13 – <i>Impact moling</i> (TrenchlessWorld 2009) .....	19
Fig. 2.14 – Pipe ramming (TT-Group 2011) .....	20
Fig. 3.1 – Zonas de <i>pipe jacking</i> , adaptado de (HOBAS 2010) .....	25
Fig. 3.2 – Curso de um túnel (Thomson 1993) .....	27
Fig. 3.3 – Tubo de betão (UCM 2011) .....	28
Fig. 3.4 – Tubo cerâmico (Exponent 2010).....	28
Fig. 3.5 – Tubo de fibra de vidro (GRP) (HOBAS 2011).....	28
Fig. 3.6 – Tubo de plástico (egeplast 2011).....	28
Fig. 3.7 – Tubo de aço (Permalok 2011).....	28
Fig. 3.8 – Tubo compósito de agregados e resina de poliéster POLICRETE® (Meyer 2011) .....	28
Fig. 3.9 – Esquemas de juntas tipo, para tubos de <i>pipe jacking</i> (BSEN-1916 2002) .....	30
Fig. 3.10 – Juntas rebatidas para tubos de betão (Thomson 1993) .....	31
Fig. 3.11 - Juntas com colares fixos para tubos de betão (Thomson 1993).....	31
Fig. 3.12 – Junta com colar solto para tubos de betão (Thomson 1993) .....	31
Fig. 3.13 – Junta com colar em T para tubos de betão (Thomson 1993) .....	32
Fig. 3.14 – Esquema de junta para tubos Hobas de GRP (Thomson 1993) .....	32
Fig. 3.15 – Esquema em 3D de uma junta para tubos Hobas de GRP (HOBAS 2010) .....	33
Fig. 3.16 – Tipos de juntas para tubos cerâmicos em função dos diâmetros nominais (Thomson 1993) .....	33
Fig. 3.17 – Pormenor de uma junta de tubos de PVC com módulo SLR (egeplast 2011) .....	34
Fig. 3.18 – Esquema de junta tipo TD para tubos de ferro fundido dúctil – DN 300-1600 mm (KUBOTA 2007) .....	34
Fig. 3.19 - Esquema de junta tipo UD para tubos de ferro fundido dúctil – DN 700-2600 mm (KUBOTA 2007) .....	35

Fig. 3.20 – Sistema de lubrificação tipo, aplicado a um tubo de <i>pipe jacking</i> (PJA 1995).....	35
Fig. 3.21 – Estação de empurre intermédia (IJS) (Akkerman 2011) .....	36
Fig. 3.22 – Esquema de operação de uma IJS (Thomson 1993) .....	37
Fig. 3.23 – Comprimentos indicativos de trechos entre poços em função do diâmetro da conduta e da técnica de escavação utilizada (PJA 1995).....	37
Fig. 3.24 – Contentor de transporte de solo movido a bateria sobre carris “ <i>Akkerman 1548 Haul Unit</i> ” (Akkerman 2011) .....	39
Fig. 3.25 – Bomba volumétrica rotativa tipo “ <i>Putzmeister TMP 16</i> ” (Thomson 1993) .....	40
Fig. 3.26 - Rosca transportadora do tipo “ <i>Wesfalia WBM-L12</i> ” (Thomson 1993).....	42
Fig. 3.27 – Esquema geral de um poço de ataque (PJA 1995) .....	43
Fig. 3.28 – Equipamento de empurre com cilindros telescópicos hidráulicos, SEGOQUI HT-2000 (TalleresSegovia 2009).....	44
Fig. 3.29 – Equipamento de empurre com estrutura móvel sobre estrutura fixa (Akkerman 2011) .....	45
Fig. 3.30 – Equipamento de empurre com macacos de curso curto e espaçadores metálicos (Iseki 2009).....	45
Fig. 3.31 – Modo de rotação da parede de reacção (Thomson 1993).....	46
Fig. 3.32 – Relação entre o movimento da parede e o impulso mobilizado (Thomson 1993).....	47
Fig. 3.33 – Esquema de um curso de um túnel visitável, monitorizado com estação total e prismas de desvio de laser (PPS 2011).....	49
Fig. 3.34 – Diagrama funcional de um sistema de orientação de um túnel em curva construído com <i>pipe jacking</i> (PPS 2011) .....	50
Fig. 3.35 - Dois tipos de painel de controlo e monitorização da frente de escavação com CCTV (Akkerman 2011) .....	51
Fig. 3.36 – Sistema de monitorização e orientação com direcção automática e CCTV, adaptado de (Thomson 1993) .....	52
Fig. 3.37 – Escavações não suportadas, adaptado de (DIN 4124 2002-10) .....	55
Fig. 3.38 – Suporte vertical convencional em secção rectangular e circular (Bradshaw 2011).....	56
Fig. 3.39 – Placas de suporte em poço de secção circular ( <i>J &amp; J Boring, Inc.</i> 2011).....	57
Fig. 3.40 – Suporte em estacas prancha de um poço rectangular (Huxted 2011).....	58
Fig. 3.41 - Ensecadeira realizada em estacas secantes (TBM 2011).....	58
Fig. 3.42 – Suporte de poços em caixão (Bradshaw 2011) .....	59
Fig. 3.43 – Rebaixamento do nível freático por bombagem (Bradshaw 2011) .....	60
Fig. 3.44 – Estabilização de solo por <i>jet grouting</i> (Layne 2011) .....	60
Fig. 3.45 – Unidade primária de alimentação hidráulica, Power Pack A100Q (Akkerman 2011).....	61
Fig. 3.46 – Exemplo de uma zona de armazenamento e manuseamento dos tubos a colocar no poço de ataque (Herrenknecht 2011).....	62
Fig. 4.1 - Lista de valores de $M_i$ , fornecidos pelo RockLab.....	75
Fig. 4.2 - Quadro para determinação do factor de perturbação, fornecido pelo RockLab.....	75
Fig. 4.3 - Análise de resistência da rocha efectuada pelo RockLab .....	75
Fig. 4.4 - Representação das variáveis da solução de <i>Kirsch</i> (Goodman 1989).....	76
Fig. 4.5 - Concentração de tensões nas imediações da abertura para a solução de <i>Kirsch</i> (Goodman 1989).....	77

Fig. 4.6 - Imagem de apresentação do programa Phase <sup>2</sup> da Rocscience Inc.....	78
Fig. 4.7 - Definição das fronteiras, externas e de escavação, do modelo .....	79
Fig. 4.8 - Propriedades elásticas do material “Solo”, a atribuir ao maciço .....	80
Fig. 4.9 - Malha gerada e solo atribuído à geometria da etapa 1 .....	80
Fig. 4.10 - Malha gerada, solo e escavação atribuídos à geometria da etapa 2 .....	81
Fig. 4.11 - Modelo completo (EPD) para a etapa 1, com malha de elementos finitos, condições de apoio e carregamento inicial .....	82
Fig. 4.12 - Definição da fronteira externa para o modelo axissimétrico .....	83
Fig. 4.13 - Definição das fronteiras de escavação para o modelo de cálculo elástico .....	84
Fig. 4.14 - Definição das fronteiras de escavação e de divisão por materiais para o modelo de cálculo plástico .....	85
Fig. 4.15 - Modelo axissimétrico completo para a etapa 1 e para a situação de cálculo elástico .....	86
Fig. 4.16 - Modelo axissimétrico completo para a etapa 1 e para a situação de cálculo plástico .....	86
Fig. 4.17 - Pormenor da discretização da malha na zona de escavação para o modelo de análise plástica .....	87
Fig. 4.18 - Propriedades plásticas do material “Solo”, a atribuir ao maciço .....	87
Fig. 4.19 - Propriedades plásticas do material “Betão anéis”, a atribuir aos tubos de betão .....	88
Fig. 4.20 - Propriedades plásticas do material “Lama redução atrito”, a atribuir ao fluido de redução de atrito estrutura/macizo .....	88
Fig. 4.21 - Evolução da zona de escavação para o modelo elástico .....	89
Fig. 4.22 - Evolução da zona de escavação e de introdução do tubo de betão para o modelo plástico .....	91
Fig. 5.1 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção horizontal, para $k=0$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	94
Fig. 5.2 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção vertical, para $k=0$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	95
Fig. 5.3 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção horizontal, para $k=1$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	95
Fig. 5.4 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção vertical, para $k=1$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	96
Fig. 5.5 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção horizontal, para $k=2$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	96
Fig. 5.6 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção vertical, para $k=2$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	97
Fig. 5.7 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção horizontal, para $k=3$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	97
Fig. 5.8 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção vertical, para $k=3$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	98
Fig. 5.9 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção horizontal, para $k=4$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	98
Fig. 5.10 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção vertical, para $k=4$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	99
Fig. 5.11 - Gráfico de tensões normalizadas na direcção horizontal, para a solução de <i>Kirsch</i> .....	99

Fig. 5.12 - Gráfico de tensões normalizadas na direcção vertical, para a solução de <i>Kirsch</i> .....	100
Fig. 5.13 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção horizontal, para $k=0$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	101
Fig. 5.14 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção vertical, para $k=0$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	101
Fig. 5.15 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção horizontal, para $k=1$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	102
Fig. 5.16 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção vertical, para $k=1$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	102
Fig. 5.17 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção horizontal, para $k=2$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	103
Fig. 5.18 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção vertical, para $k=2$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	103
Fig. 5.19 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção horizontal, para $k=3$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	104
Fig. 5.20 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção vertical, para $k=3$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	104
Fig. 5.21 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção horizontal, para $k=4$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	105
Fig. 5.22 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção vertical, para $k=4$ com a solução de <i>Kirsch</i> .....	105
Fig. 5.23 - Distribuição de tensões $\sigma_x$ , para $k=0$ com modelo do estado plano de deformação .....	107
Fig. 5.24 - Distribuição de tensões $\sigma_y$ , para $k=0$ com modelo do estado plano de deformação .....	108
Fig. 5.25 - Gráfico de tensões $\sigma_x$ e $\sigma_y$ na direcção horizontal, para $k=0$ com modelo do estado plano de deformação .....	108
Fig. 5.26 - Gráfico de tensões $\sigma_x$ e $\sigma_y$ na direcção vertical, para $k=0$ com modelo do estado plano de deformação .....	109
Fig. 5.27 - Distribuição de tensões $\sigma_x$ , para $k=1$ com modelo do estado plano de deformação .....	109
Fig. 5.28 - Distribuição de tensões $\sigma_y$ , para $k=1$ com modelo do estado plano de deformação .....	110
Fig. 5.29 - Gráfico de tensões $\sigma_x$ e $\sigma_y$ na direcção horizontal, para $k=1$ com modelo do estado plano de deformação .....	110
Fig. 5.30 - Gráfico de tensões $\sigma_x$ e $\sigma_y$ na direcção vertical, para $k=1$ com modelo do estado plano de deformação .....	111
Fig. 5.31 - Distribuição de tensões $\sigma_x$ , para $k=2$ com modelo do estado plano de deformação .....	111
Fig. 5.32 - Distribuição de tensões $\sigma_y$ , para $k=2$ com modelo do estado plano de deformação .....	112
Fig. 5.33 - Gráfico de tensões $\sigma_x$ e $\sigma_y$ na direcção horizontal, para $k=2$ com modelo do estado plano de deformação .....	112
Fig. 5.34 - Gráfico de tensões $\sigma_x$ e $\sigma_y$ na direcção vertical, para $k=2$ com modelo do estado plano de deformação .....	113
Fig. 5.35 - Distribuição de tensões $\sigma_x$ , para $k=3$ com modelo do estado plano de deformação .....	113
Fig. 5.36 - Distribuição de tensões $\sigma_y$ , para $k=3$ com modelo do estado plano de deformação .....	114
Fig. 5.37 - Gráfico de tensões $\sigma_x$ e $\sigma_y$ na direcção horizontal, para $k=3$ com modelo do estado plano de deformação .....	114

Fig. 5.38 - Gráfico de tensões $\sigma_x$ e $\sigma_y$ na direcção vertical, para $k=3$ com modelo do estado plano de deformação.....	115
Fig. 5.39 - Distribuição de tensões $\sigma_x$ , para $k=4$ com modelo do estado plano de deformação.....	115
Fig. 5.40 - Distribuição de tensões $\sigma_y$ , para $k=4$ com modelo do estado plano de deformação.....	116
Fig. 5.41 - Gráfico de tensões $\sigma_x$ e $\sigma_y$ na direcção horizontal, para $k=4$ com modelo do estado plano de deformação.....	116
Fig. 5.42 - Gráfico de tensões $\sigma_x$ e $\sigma_y$ na direcção vertical, para $k=4$ com modelo do estado plano de deformação.....	117
Fig. 5.43 - Distribuição de deslocamentos $u_x$ , para $k=0$ com modelo do estado plano de deformação .....	118
Fig. 5.44 - Distribuição de deslocamentos $u_y$ , para $k=0$ com modelo do estado plano de deformação .....	118
Fig. 5.45 - Gráfico de deslocamentos $u_x$ na direcção horizontal, para $k=0$ com modelo do estado plano de deformação.....	119
Fig. 5.46 - Gráfico de deslocamentos $u_y$ na direcção vertical, para $k=0$ com modelo do estado plano de deformação.....	119
Fig. 5.47 - Distribuição de deslocamentos $u_x$ , para $k=1$ com modelo do estado plano de deformação .....	120
Fig. 5.48 - Distribuição de deslocamentos $u_y$ , para $k=1$ com modelo do estado plano de deformação .....	120
Fig. 5.49 - Gráfico de deslocamentos $u_x$ na direcção horizontal, para $k=1$ com modelo do estado plano de deformação.....	121
Fig. 5.50 - Gráfico de deslocamentos $u_y$ na direcção vertical, para $k=1$ com modelo do estado plano de deformação.....	121
Fig. 5.51 - Distribuição de deslocamentos $u_x$ , para $k=2$ com modelo do estado plano de deformação .....	122
Fig. 5.52 - Distribuição de deslocamentos $u_y$ , para $k=2$ com modelo do estado plano de deformação .....	122
Fig. 5.53 - Gráfico de deslocamentos $u_x$ na direcção horizontal, para $k=2$ com modelo do estado plano de deformação.....	123
Fig. 5.54 - Gráfico de deslocamentos $u_y$ na direcção vertical, para $k=2$ com modelo do estado plano de deformação.....	123
Fig. 5.55 - Distribuição de deslocamentos $u_x$ , para $k=3$ com modelo do estado plano de deformação .....	124
Fig. 5.56 - Distribuição de deslocamentos $u_y$ , para $k=3$ com modelo do estado plano de deformação .....	124
Fig. 5.57 - Gráfico de deslocamentos $u_x$ na direcção horizontal, para $k=3$ com modelo do estado plano de deformação.....	125
Fig. 5.58 - Gráfico de deslocamentos $u_y$ na direcção vertical, para $k=3$ com modelo do estado plano de deformação.....	125
Fig. 5.59 - Distribuição de deslocamentos $u_x$ , para $k=4$ com modelo do estado plano de deformação .....	126
Fig. 5.60 - Distribuição de deslocamentos $u_y$ , para $k=4$ com modelo do estado plano de deformação .....	126

Fig. 5.61 - Gráfico de deslocamentos $u_x$ na direcção horizontal, para $k=4$ com modelo do estado plano de deformação .....	127
Fig. 5.62 - Gráfico de deslocamentos $u_y$ na direcção vertical, para $k=4$ com modelo do estado plano de deformação .....	127
Fig. 5.63 - Distribuição de deslocamentos na direcção radial, para o modelo axissimétrico elástico	129
Fig. 5.64 - Deslocamentos radiais no plano transversal ao eixo do túnel, para o modelo axissimétrico elástico .....	129
Fig. 5.65 - Deslocamentos no alinhamento da parede do túnel, na direcção radial, para o modelo axissimétrico elástico .....	130
Fig. 5.66 - Deslocamentos radiais normalizados em função da relação da distância à frente e do diâmetro, para o modelo axissimétrico elástico .....	131
Fig. 5.67 - Distribuição de tensões principais máximas, antes do empurre, para o modelo axissimétrico plástico .....	132
Fig. 5.68 - Distribuição de tensões principais mínimas, antes do empurre, para o modelo axissimétrico plástico .....	132
Fig. 5.69 - Distribuição de tensões principais máximas, no final do empurre, para o modelo axissimétrico plástico .....	132
Fig. 5.70 - Distribuição de tensões principais mínimas, no final do empurre, para o modelo axissimétrico plástico .....	132
Fig. 5.71 - Pormenor da zona de escavação com a linha de recolha de resultados, para os deslocamentos do tubo de betão com as cargas de empurre, para o modelo axissimétrico plástico	133
Fig. 5.72 - Deslocamento da face do tubo de betão no sentido do empurre, face às forças de empurre, para o modelo axissimétrico plástico .....	134
Fig. 5.73 - Deslocamento absoluto, pontual médio do tubo, no sentido do empurre, em função da carga de empurre, para o modelo axissimétrico plástico .....	134
Fig. 5.74 - Distribuição das deformações máximas de corte nas imediações da zona de escavação, no momento antes do empurre, para o modelo axissimétrico plástico .....	135
Fig. 5.75 - Tensões de corte mobilizadas ao longo da superfície do tubo, em função dos diversos carregamentos, para o modelo axissimétrico plástico .....	136



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores típicos dos parâmetros de Horton para vários tipos de superfícies.....	10
Tabela 3.1 – Requisitos gerais para tubos e elementos de ligação utilizados em sistemas de drenagem (EN 14457).....	29
Tabela 3.2 – Parâmetros a serem considerados em relação a cada tipo de solo (PJA 1995).....	64
Tabela 3.3 – Temos descritivos para valores de RQD (Thomson 1993).....	69
Tabela 3.4 – Termos descritivos para valores de resistência à compressão (Thomson 1993) .....	69
Tabela 4.1 - Características das classes geomecânicas (Topa-Gomes et al. 2002) .....	74
Tabela 4.2 - Parâmetros geomecânicos do maciço rochoso (Topa-Gomes et al. 2002) .....	74
Tabela 5.1 - Relações entre os sentidos dos resultados obtidos, para a solução teórica e para o modelo numérico .....	107







# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Definição do âmbito

Numa época em que a problemática da ocupação do solo, cada vez mais, condiciona a actividade humana, é necessário adoptar sistemas inovadores de modo a contornar e evitar certas condicionantes com as quais nos deparamos diariamente.

O tema, ocupação do solo, remete-nos para um vasto campo de acção. Neste momento, vamos focar-nos em três campos da ocupação do solo: a sua impermeabilização, a sua utilização pelas pessoas e respectivas actividades e a ocupação do subsolo.

Com a crescente evolução, a necessidade de criação de pavimentos que proporcionem um deslocamento mais rápido e com maior conforto tem sido uma prioridade. Como tal, com a utilização automóvel e com a evolução dos materiais, o solo que há muitos anos atrás se encontrava exposto teve a necessidade de ser revestido por pavimentos que facilitam as deslocações. Isto é um mero exemplo da forte impermeabilização dos solos. Em áreas urbanas, a começar pelas estradas, é cada vez mais comum a utilização dos mais diversos tipos de materiais para revestimento dos pavimentos, nos passeios para peões, em praças públicas, nas áreas descobertas dos edifícios, em quase todo o chão que pisamos. Este facto tem como consequência uma forte impermeabilização do solo, promovendo o aumento da velocidade das águas pluviais sobre estes pavimentos, não garantindo a sua infiltração e consequentemente aumentando de uma forma exponencial o caudal nos sistemas de colectores de águas pluviais.

Na questão da utilização, a construção em altura é uma consequência da grande ocupação do solo, que já não é suficiente para que a actividade humana se desenvolva ao nível térreo, tendo a necessidade de criar espaços “sobrepastos”. Como se pode observar num panorama geral das áreas urbanas, e cada vez mais das suas zonas periféricas, o congestionamento a nível de pessoas, veículos, infra-estruturas e serviços é tal, que a realização de pequenas obras que envolvam a ocupação da via pública pode provocar um anormal funcionamento da vida das pessoas que utilizam aquele espaço, ainda mesmo que essa ocupação seja de curta duração.

Estando a superfície cada vez mais ocupada, há a necessidade de recorrer ao subsolo para a criação de locais que permitam criação de infra-estruturas, de uma forma mais rápida e sem interferência com outras actividades. Como exemplos destas infra-estruturas, são de referir as tubagens para abastecimento de água ou para recolha de águas residuais, as canalizações de gás, as condutas para a passagem de cablagem, seja para transmissão de dados ou mesmo de electricidade, ou ainda as redes subterrâneas dos metropolitanos que facilitam o transporte de pessoas nos grandes centros urbanos, podendo estas e outras infra-estruturas coexistir nos mesmos locais ainda que a diferentes profundidades, o que torna a sua articulação cada vez mais complexa.

Tendo em conta estes três campos da ocupação do solo, havendo a necessidade de efectuar uma nova instalação subterrânea ou a reabilitação de uma pré existente, é cada vez mais necessário um projecto com um grau mais elevado de estudo e detalhe, para que esta operação seja executada de forma a não interferir com as restantes actividades e infra-estruturas.

A evolução das técnicas de construção de obras subterrâneas permite-nos hoje em dia o recurso a uma técnica de execução de túneis com um impacto reduzido, quer em termos de ocupação de espaço útil de apoio à superfície, quer de interferência com infra-estruturas pré existentes no subsolo ou à superfície que se encontrem sobre o seu alinhamento, quer de tempo de execução por permitir um rendimento muito maior, quando comparada com as técnicas convencionais. Como é o caso da técnica de execução de túneis com recurso a anéis empurrados, também conhecida na gíria internacional como *pipe jacking*.

Esta técnica, para além das reduzidas interferências com o meio, permite a utilização de uma vasta gama de diâmetros, desde uma execução controlada remotamente caso as restrições de tamanho dos tubos o exijam, até à construção de tubagens de grandes diâmetros, quando comparados com a dimensão humana, praticamente com o mesmo grau de dificuldade.

A utilização dos grandes diâmetros para sistemas de recolha de águas pluviais é uma mais-valia em zonas que por questões de localização geográfica (zonas de clima tropical, em que a precipitação é intensa durante períodos significativos do dia) ou por questões de uma elevada taxa de impermeabilização do solo, têm a necessidade de um rápido escoamento de grandes quantidades de água que aí afluem, pois estes sistemas, devido à sua capacidade de encaixe, funcionam como verdadeiros reservatórios ao longo do sistema colector, uma vez que retardam a sobrecarga das estações de tratamento e conseqüentemente o seu lançamento nos afluentes.

## **1.2 Objectivos**

O recurso a tuneladoras com diâmetros até 4,0m, acoplada a anéis de betão pré-fabricados conduzidos pela técnica de empurre, é uma solução muito útil na execução de exutores submarinos em áreas marítimas de fortes marés e rebentação ou por razões ambientais. O dimensionamento de todo o sistema recorre a importantes estudos e análises de carácter geotécnico. Pretende-se estudar o conjunto de verificações e dimensionamentos com base num projecto executado com o recurso a uma análise apoiada em modelos criados com base no programa informático Phase<sup>2</sup>, que tem por base o método dos elementos finitos.

## **1.3 Estado da arte em Portugal**

O tipo de construção de túneis analisado no presente trabalho, não utiliza as metodologias mais conhecidas e mais utilizadas no dia-a-dia para a execução de tal prática, mas sim, um sistema interligado de múltiplas valências tecnológicas a funcionar em conjunto, de modo a promover uma construção mais rápida do que as práticas correntes e com um impacto o mais reduzido possível com as actividades que se desenrolam à superfície, tanto sobre o alinhamento do túnel como na zona de introdução de equipamentos. Embora seja um método que não é comum encontrar em qualquer obra, principalmente em Portugal, tem vindo a tornar-se cada vez mais implementado por todo o mundo, dadas as suas inúmeras vantagens face aos métodos tradicionais. O método de construção de túneis com o recurso ao empurre de anéis de betão, ou mais conhecido como *pipe jacking*, é uma mais-valia em determinados tipos de obra, pela sua versatilidade na adaptação às mais variadas restrições tanto em questões de espaço como técnicas, a que essas obras possam estar sujeitas.

Em Portugal, não se encontram muitos registos da utilização desta técnica para a construção de túneis. Felizmente com a colaboração do GEG - Gabinete de Estruturas e Geotecnia, conseguiu-se o acesso à informação sobre duas obras realizadas em território nacional. Baseado em documentos gentilmente cedidos pelo GEG, serão apresentados de um modo geral, as duas obras realizadas com recurso à técnica de *pipe jacking*, tendo sido uma realizada em Matosinhos e a outra em Mira.

### 1.3.1 Exutor submarino de Matosinhos

O túnel com recurso ao empurre de anéis de betão foi executado no ano de 1995 dentro do projecto “Empreitada de Concepção, Construção e Operação da ETAR e Exutor Submarino de Matosinhos”, tendo como dono de obra os Serviços Municipalizados de Águas e Saneamento de Matosinhos.

A execução deste exutor revelou-se de uma especial importância uma vez que, para além de ser submarino, foi executado de modo a superar a zona de rebentamento de ondas, na sua secção mais a jusante. Tendo sido portanto necessário recorrer a meios *offshore* para a execução da parte da obra a jusante da secção final do túnel, e necessário realizar um acompanhamento cuidadoso das condições meteorológicas e da natureza dos fundos, uma vez que são factores que influenciam o normal desenvolvimento da obra.

O projecto do exutor foi dividido em 4 partes constituintes, fundamentais, sendo elas: o poço de ataque, o microtúnel, a parte da tubagem de polietileno em *offshore* e os difusores.

A função última do poço de ataque é, garantir o acesso ao microtúnel, tendo sido dimensionado em função do espaço necessário para a instalação da estação de empurre principal e das dimensões do primeiro módulo da tuneladora, sendo esta a situação mais desfavorável. O poço de ataque foi escavado no interior de uma cortina de estacas, realizada como suporte, até à profundidade em que foi encontrado um maciço rochoso. Maciço esse, que foi desmontado com recurso a explosivos até à cota desejada, sendo a sua consolidação e estabilização obtida com a execução de pregagens.

O microtúnel propriamente dito, tem o comprimento total de cerca de 840m de modo a abranger a totalidade da zona de rebentamento. A execução de um exutor submarino na zona de rebentamento, é uma tarefa que se assume com uma elevada dependência das condições climáticas que se fazem sentir à data da realização dos trabalhos, traduzidas nas alturas de onda, períodos e orientação da ondulação. Havia a necessidade de construir a obra apenas num período de um verão. Era necessário minimizar o impacto ambiental das obras de carácter provisório necessárias à execução base. Devia ser evitado o movimento de terras na zona da praia e a destruição dos taludes de aterro de transição entre a praia e a plataforma da ETAR, devendo ainda ser garantida a viabilidade da utilização da praia durante a época balnear em que foi executada a obra. Factos pelos quais foi adoptada a construção deste exutor com o recurso a anéis de betão empurrados e escavação com TBM (*tunnel boring machine*), uma vez que com a adopção desta técnica foram garantidas todas as exigências impostas.

Em perfil, o microtúnel executado possui 3 zonas. Uma primeira em trainel recto com 60m de comprimento e 5,2% de inclinação, uma segunda em curva circular com cerca de 7000m de raio e uma terceira zona também em trainel recto com 433m de comprimento e 0,3% de inclinação.

Em relação aos tubos utilizados, estes possuíam um comprimento de 3m por secção, uma chapa de aço exterior de 3mm, de forma a assegurar a estanqueidade e reserva de resistência ao desgaste por fricção aquando da execução, uma camada de betão com 170mm da classe C80/95 reforçado com armadura de aço S500 e uma pintura de revestimento interior com tinta à base de epoxi, possuindo assim um diâmetro interior útil de 1600mm e um diâmetro exterior de 1960mm. Os segmentos de tubo foram

dimensionados para resistirem a uma pressão hidráulica máxima interior de 25mca e uma pressão máxima exterior de 30mca. Tendo em conta todos os conjuntos de estações de empurre utilizadas na execução, a força de empurre de cálculo da tubagem era de 12000kN.

Foram utilizadas na execução, 3 tipos de estações de empurre. Uma estação principal acoplada a uma placa de reacção montada na parede do poço de ataque, oposta àquela onde o túnel será executado, sendo constituída por 2 a 4 macacos, conforme a necessidade de empurre, com 3000kN de capacidade de empurre cada e com um curso de 4000mm, podendo atingir um total de 12000kN de capacidade de empurre. Uma estação de empurre junto à tuneladora para recuo da mesma para a necessidade de substituição dos discos de corte, sendo constituída por 6 macacos de 1250kN e 830mm de curso, perfazendo um total de 7500kN de capacidade de empurre. Em cada 100m de túnel executado foram montadas estações de empurre intermédias, de modo a limitar a tensão instada nas paredes do tubo, munidas de 12 macacos cada um com a capacidade de empurre de 850kN e 350mm de curso, possuindo a estação intermédia uma capacidade total de empurre de 10200kN.

De modo a diminuir o atrito entre a tubagem e o maciço envolvente, houve a necessidade de proceder à injeção de bentonite nesse espaço intersticial, sendo a pressão de injeção determinada em função do esforço dos macacos necessários para o empurre da tubagem.

A tuneladora utilizada, foi sujeita a um processo minucioso de resgate por meio de uma plataforma flutuante auto-elevatória, munida com uma torre de perfuração e uma grua, tendo sido toda a operação de resgate acompanhada por equipas de mergulhadores.

### 1.3.2 Aquícola de engorda de Pregado em Mira

A empresa “Pescanova”, que se dedica à captura e processamento de produtos provenientes do mar desde o princípio da década de 60, actualmente com a maior frota pesqueira do mundo, decidiu no ano de 2006 dar um salto quantitativo e qualitativo, dada a sua suficiente experiência, continuando com o seu processo de expansão.

Este processo de expansão, passou pelo aumento significativo da sua capacidade de produção, realizando os projectos necessários para a criação de 3 novas unidades, situando-se duas delas em Espanha com as capacidades de produção de 1.800 toneladas e 2.000 toneladas cada uma, e outra em Mira, com a capacidade de produção de 10.500 toneladas.

A unidade criada em Mira, estende-se por uma área de 2.060.872m<sup>2</sup>, com 3 fases de execução de 3.500 toneladas dispostas por uma faixa de 1.000m na direcção Este-Oeste e de 500m na direcção Norte-Sul. Esta unidade de Mira, corresponde a um aquícola de engorda da espécie de peixe Pregado. As 3 fases de execução realizaram-se no período de tempo compreendido entre os anos 2007 e 2010.

Entre outras instalações de serviços, o aquícola é composto por vários conjuntos de tanques de produção, divididos entre tanques e naves, de pré-engorda e de engorda. Estas infra estruturas, em serviço fazem a ligação com a água do mar por meio de emissários de adução e descarga.

Foram executados dois emissários de adução, cada um constituído por um poço de ataque, um tramo executado em anéis de betão armado em empurrados e um tramo realizado com tubagem de polietileno em trincheira. Foram também executados dois emissários de descarga, tendo sido estes realizados apenas com anéis de betão empurrados a partir de um poço de ataque.

Os poços de ataque dos emissários de adução, que mais tarde na fase de serviço deram origem aos poços de captação, são constituídos por um polígono de 12 arcos, possuindo cada arco 3 segmentos de



recta, tangentes a uma circunferência com 12m de raio. Os poços foram executados com paredes moldadas de betão armado, possuindo uma profundidade de 32,45m. Estas paredes foram reforçadas nas zonas tangentes à cravação das tubagens com a técnica de *pipe jacking*. No fundo dos poços foi realizada uma laje em betão armado com 0,60m de espessura. Ficaram ainda implantados nos poços um muro de reacção para a tuneladora, executado em betão armado, com 6,0m de largura por 3,60m de profundidade e 6,0m de altura.

O tramo realizado com anéis de betão empurrados, de cada emissário de adução, foi executado com um comprimento de 1500m em empurre, possuindo cada um as inclinações de 6,2‰ e 6,53‰, respectivamente. Para estes tramos, foram utilizados tubos de betão armado HA50 de 3000mm de diâmetro interior e 3800mm de diâmetro exterior, pelo que as suas paredes possuem uma espessura de 40cm, de forma a evitar a flutuação dos tubos. Cada secção de tubo possui um comprimento de 4m, tendo sido os tubos dimensionados para uma capacidade de empurre de 3600 toneladas e fabricados com betão com características resistentes às acções da água do mar. Foi estimada uma produção média diária na fase de execução, de 6 tubos/dia, pelo que foram executados em cada dia 24m de túnel.

Para a escavação do túnel, seguiu na frente dos tubos uma tuneladora de escudo fechado, do tipo *Herrenknecht AVN3000*, com um sistema de evacuação de resíduos por via húmida. A tuneladora era accionada por controlo remoto, a partir de um contentor localizado à superfície, completamente computadorizado.

Os tramos dos emissários de adução executados em polietileno, foram ligados aos tramos executados em anéis de betão por intermédio de peças desenhadas especificamente para o efeito, depois de instalados. Estes tramos, visto serem muito extensos, foram executados em três troços de 442,30m de comprimento cada, o que perfaz um comprimento total de 1326,90m do tramo de tubagem de polietileno. Os dois primeiros troços deste tramo, foram executados com tubos de polietileno de alta densidade PE100, com diâmetro exterior de 2000mm, com SDR 26 e espessura da parede de 76,90mm. O último troço foi executado em polietileno de alta densidade PE100, com diâmetro exterior de 1400mm, SDR 26 e espessura da parede de 53,50mm.

Os emissários de descarga, foram executados com poços de ataque com a geometria de um polígono irregular de 20 lados, com uma separação entre os lados opostos de 18m. Tal como os poços de ataque dos emissários de adução, estes foram realizados com paredes moldadas de betão armado, com uma profundidade de 25,32m. Possuem uma laje de fundo de betão armado, igualmente com 0,60m de espessura e tal como nos emissários de adução, ficaram aí implantados os muros de reacção para a tuneladora, com as mesmas características e dimensões.

Os tramos dos emissários de descarga foram executados apenas com anéis de betão empurrados, com as características de tubagem idênticas às dos emissários de adução, sendo que estes possuem um comprimento total de 1350m e uma inclinação de 1,1‰ cada um, tendo sido utilizadas 16 estações de empurre intermédias na sua execução, para além da unidade principal de empurre.

Na Fig. 1.1, pode observar-se um esquema da implantação da unidade de engorda e dos respectivos emissários, junto da costa.

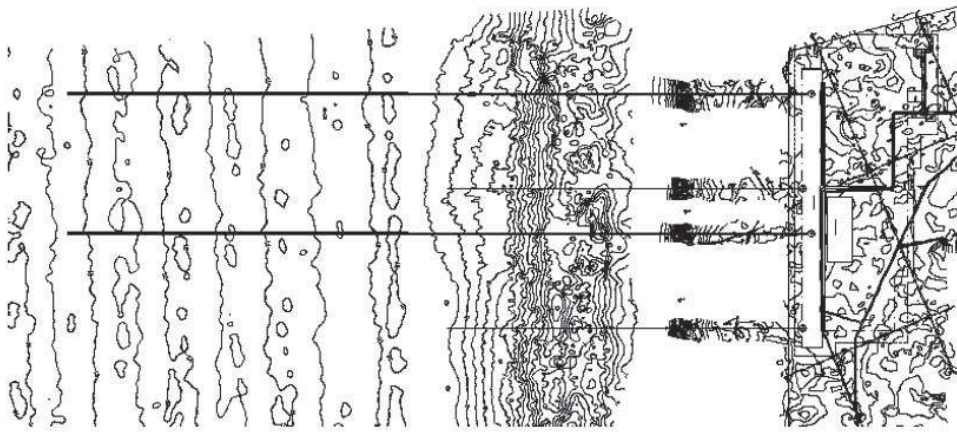


Fig. 1.1 - Esquema da implantação do aquícola de engorda de Pregado de Mira

## 1.4 Organização em capítulos

O presente trabalho encontra-se em 6 capítulos base, apresentados resumidamente a seguir.

No Capítulo 1 é apresentada uma definição do âmbito, de modo a enquadrar a técnica estudada, bem como são apresentados dois casos executados em Portugal com o recurso à técnica de *pipe jacking*. São ainda apresentados os objectivos da dissertação bem como a sua distribuição por capítulos.

O Capítulo 2 remete o leitor para a problemática da drenagem urbana e das águas pluviais, apresentando uma abordagem a estes dois conceitos, a interferência que os efeitos da impermeabilização do solo provocam e apresenta ainda os vários tipos de construção de sistemas de recolha de águas, bem como os vários tipos de tubagens neles utilizadas.

No Capítulo 3 é apresentada a técnica de *pipe jacking*, os elementos que a constituem, os tipos e características dos materiais utilizados na sua implementação, os processos ocorridos nas diferentes zonas de execução e a investigação geológica e geotécnica necessária ao projecto.

O Capítulo 4 apresenta uma descrição e pormenorização dos modelos utilizados, as características e parâmetros dos materiais modelados, uma solução teórica para aferição do modelo de cálculo e uma descrição pormenorizada da modelação no programa Phase<sup>2</sup>.

O Capítulo 5 destina-se à análise dos resultados obtidos pelas soluções preconizadas, apresentando os resultados da solução teórica, das soluções modeladas no programa de cálculo automático e as respectivas comparações e comentários.

No Capítulo 6 tecem-se as principais conclusões do presente trabalho e são propostas ideias para futuros desenvolvimentos de análise.

## 2

# DRENAGEM URBANA E ÁGUAS PLUVIAIS

### 2.1 Uma abordagem à drenagem urbana

A necessidade da existência de sistemas de drenagem em áreas urbanas desenvolvidas resulta da interacção entre a actividade humana e o ciclo natural da água. As duas formas principais desta interacção referem-se à captação de água do seu ciclo natural com o propósito de abastecer as necessidades da vida humana e à cobertura do solo por superfícies impermeáveis que promovem o desvio das águas pluviais do sistema natural de drenagem. Com esta interacção aparecem a par dois tipos de água que necessitam de drenagem para serem encaminhados aos locais receptores.

O primeiro tipo, as águas residuais, são águas que serviram para o abastecimento humano, mantendo a qualidade de vida da população e satisfizeram as necessidades industriais. Águas estas que depois de usadas, não sendo recolhidas e encaminhadas devidamente, podem ser uma fonte de poluição e riscos para a saúde, visto poderem conter materiais dissolvidos, provenientes das casas de banho, de vários tipos de lavagens, de indústrias e dos mais variados usos a que a água se pode propor.

O segundo tipo, as águas pluviais provenientes de qualquer tipo de precipitação e que caem em áreas urbanizadas, requerem uma drenagem apropriada. Caso estas águas não sejam drenadas convenientemente podem causar estragos, cheias e ainda mais riscos para a saúde, uma vez que contêm alguns poluentes provenientes das chuvas, do ar ou das superfícies por onde escorrem.

Os sistemas de drenagem urbana comportam os dois tipos de água acima descritos, com o objectivo de minimizar os problemas que possam causar à vida humana e ao ambiente, sendo as suas duas maiores interfaces, o público e o ambiente.



Fig. 2.1 – Interfaces da drenagem urbana (Butler and Davies 2011)

Em muitas áreas urbanas a drenagem destas águas é baseada num sistema completamente artificial de esgotos, tubos e estruturas que recolhem e transportam estas águas, contrastando com comunidades mais desfavorecidas que normalmente não possuem sistema principal de drenagem, podendo as águas

residuais, ser ou não, tratadas localmente e as águas pluviais simplesmente escorrerem naturalmente pelo solo.

Os dois tipos de águas drenadas, em ambiente urbano com redes de drenagem, são muitas vezes escoados pelo mesmo sistema, que comporta as águas residuais e as pluviais, dando origem aos denominados esgotos mistos, o que faz com que o escoamento de ambas, não seja eficiente em termos de impacto ambiental e de sustentabilidade. Também enquanto o fluxo desta combinação de águas é transportado pelos esgotos, sofre várias formas de transformação. Outro aspecto crítico, é o facto de embora os sistemas de esgotos possam minimizar certos problemas, como os riscos de saúde ou cheias, podem criar outros como perturbações dos cursos naturais de água em certos lugares. (Butler and Davies 2011)

## 2.2 Águas pluviais (*Stormwater*)

“As águas pluviais não são um sistema mecânico. É um processo ambiental, que junta a atmosfera, o solo, a vegetação, o uso da terra, os vapores e paisagens sustentáveis. Em cada paisagem, a queda da chuva, o brilhar do sol e o soprar do vento são o princípio de toda a vida.” (Ferguson 1998)

*Stormwater* é o segundo maior fluxo de água no que diz respeito a engenharia de drenagem. Uma drenagem segura e eficiente é importante para a manutenção da saúde e segurança pública e para proteger o ambiente aquático. Dados de confiança sobre a quantidade e a qualidade de fluxos de águas pluviais existentes e projectados são um pré-requisito do custo efectivo para projectar e analisar os sistemas de drenagem urbana.

As águas pluviais, são geradas pela água caída em forma de precipitação e consiste na proporção dessa água proveniente da chuva que escorre pelas superfícies urbanas, como se encontra ilustrado esquematicamente na Fig. 2.2.

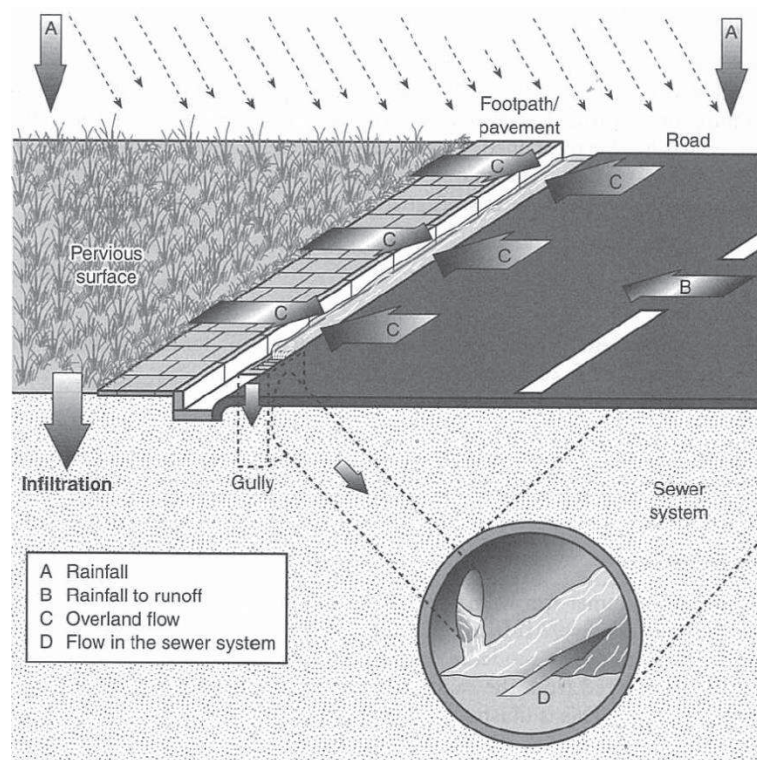


Fig. 2.2 – Processo de geração de escoamento pelas águas pluviais (Butler and Davies 2011)



A diferença entre a água precipitada durante um certo tempo e a água de um escoamento superficial, advém de vários tipos de perdas, nomeadamente das denominadas perdas iniciais e das perdas contínuas. Um esquema do ciclo hidrológico da água pode ser observado na Fig. 2.3.

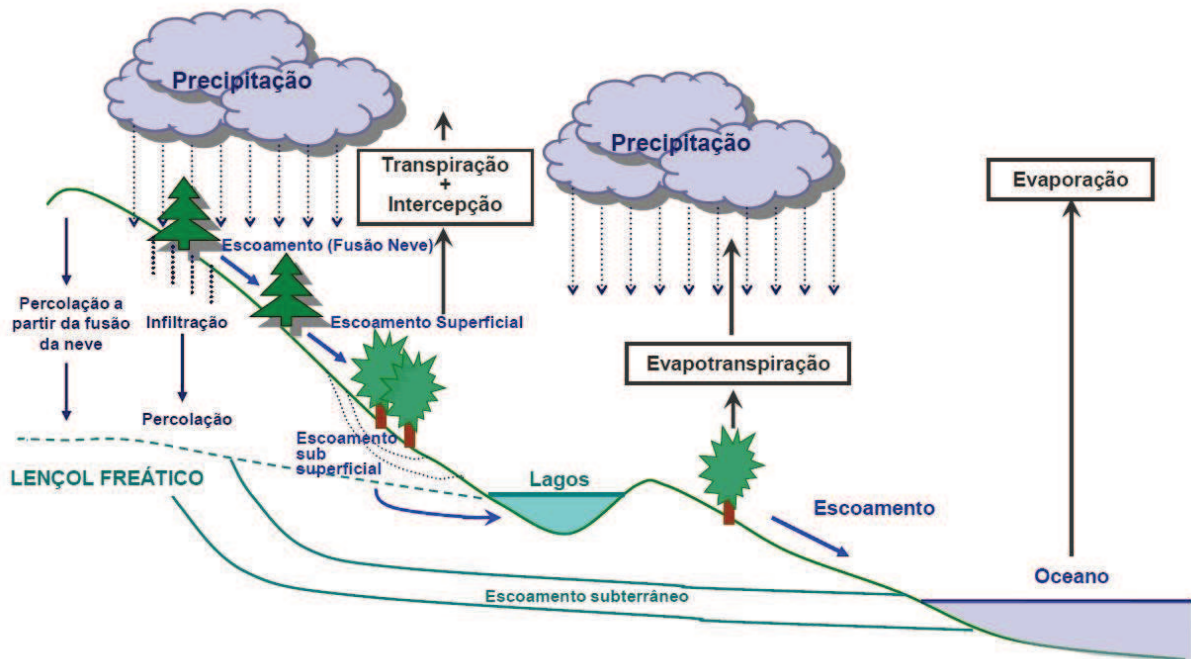


Fig. 2.3 – Ciclo hidrológico da água

Das perdas iniciais, fazem parte as perdas de interceptação e humedecimento e as perdas por armazenamento em depressões.

As perdas por interceptação e humedecimento, consistem na recolha e retenção de parte da água proveniente da chuva pela cobertura vegetal. Existe um período de retenção inicial, a partir do qual o excesso da queda de chuva escorre e cai pela folhagem ou flui até ao solo pelos caules. A proporção de interceptação rapidamente diminui e se aproxima de zero. As perdas por interceptação para pequenas áreas impermeáveis têm uma magnitude muito pequena (<1 mm) e são geralmente negligenciadas ou combinadas com as perdas por armazenamento em depressões.

As perdas por armazenamento em depressões, tal como o nome indica, dizem respeito a porções da água da chuva que ficou retida em pequenas depressões da superfície de escoamento, impedindo que esta continue o escoamento. Infiltrações, evaporação ou derrame, irão remover a água que ficou retida. Os factores que afectam a magnitude do armazenamento em depressões são o tipo de superfície, a inclinação e o período de retorno (Kidd and Lowring 1979).

A capacidade de armazenamento em depressões  $d$  (mm) pode ser representada pela equação seguinte:

$$d = \frac{k_1}{s} \quad (2.1)$$

Em que  $k_1$  (mm) é um coeficiente dependente do tipo de superfície (variando desde 0.07 para superfícies impermeáveis até 0.28 para superfícies permeáveis) e  $s$  é a inclinação da superfície.

Os valores típicos para  $d$ , variam de 0.5 a 2 mm para áreas impermeáveis, de 2.5 a 7.5 mm para telhados planos e até 10 mm para jardins.

As perdas contínuas englobam as perdas por evapotranspiração e as por infiltração. As primeiras, ocorrem devido à perda de água em forma de vapor, pela transpiração das plantas e pela evaporação de massas de água a céu aberto, que consequentemente não contribuem para o escoamento superficial. Embora seja uma perda contínua e constante, o seu efeito para chuvas de curta duração é insignificante.

As perdas por infiltração representam o processo de transição de água da superfície de escoamento para o interior do solo através dos poro do mesmo. A capacidade de infiltração de um solo é definida como o rácio de que passa para o seu interior. A magnitude desta capacidade depende de factores como o tipo de solo, sua estrutura e compactação, conteúdo da sua mistura inicial, da superfície coberta e da profundidade de água no solo. O rácio de infiltração é elevado inicialmente mas decresce exponencialmente para um regime estacionário final, quando a zona mais superficial do solo fica saturada. Uma relação empírica usada para representar a infiltração, é a equação (2.2) (Horton 1940).

$$f_t = f_c + f_0 + f_c e^{-k_2 t} \quad (2.2)$$

Onde  $f_t$  (mm/h) representa o rácio de infiltração no instante  $t$  (h),  $f_c$  (mm/h) é o rácio final de infiltração do estado estacionário ou capacidade,  $f_0$  (mm/h) é o rácio inicial e  $k_2$  ( $h^{-1}$ ) é a constante de decadência. Sendo esta equação válida para quando a intensidade da chuva é superior ao rácio do estado estacionário. Estes parâmetros dependem principalmente tipo de solo ou superfície e da mistura inicial do solo. O intervalo de valores que os parâmetros  $f_c$ ,  $f_0$  e  $k_2$  podem experimentar estão representados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Valores típicos dos parâmetros de Horton para vários tipos de superfícies

Tipo de superfície	$f_0$ (mm/h)	$f_c$ (mm/h)	$k_2$ ( $h^{-1}$ )
Solo de textura grossa	250	25	2
Solo de textura média	200	12	2
Solo de textura fina	125	6	2
Argilas / Áreas pavimentadas	75	3	2

### 2.3 Efeitos da urbanização na drenagem de águas pluviais

O efeito do desenvolvimento humano na passagem de águas pluviais pode ser reflectido com a evolução das áreas urbanizadas. A drenagem urbana substitui uma parte do ciclo natural da água, com um sistema artificial que é instalado ao invés de um sistema natural.

Na natureza, quando há ocorrência de precipitação sobre uma superfície natural, alguma da água aí caída regressa à atmosfera pela evaporação, pela transpiração das plantas, outra parte infiltra-se no solo como águas freáticas e ainda outra parte dessa mesma água escorre livremente pela superfície (Fig. 2.4 (a)). As proporções relativas de cada parte, dependem da natureza da superfície em que caem e variam com a duração do tempo de precipitação. O escoamento superficial tende a aumentar com a saturação do solo sobre o qual a água escorre. Tanto as águas freáticas como as que escoam superficialmente, procuram o caminho de um rio no qual vão desaguar, embora as águas provenientes do escoamento superficial atinjam o seu objectivo muito mais rapidamente do que as freáticas. As

águas freáticas são a contribuição para o caudal natural dos rios, em vez de contribuírem para o aumento do caudal aquando de um certo período de precipitação.

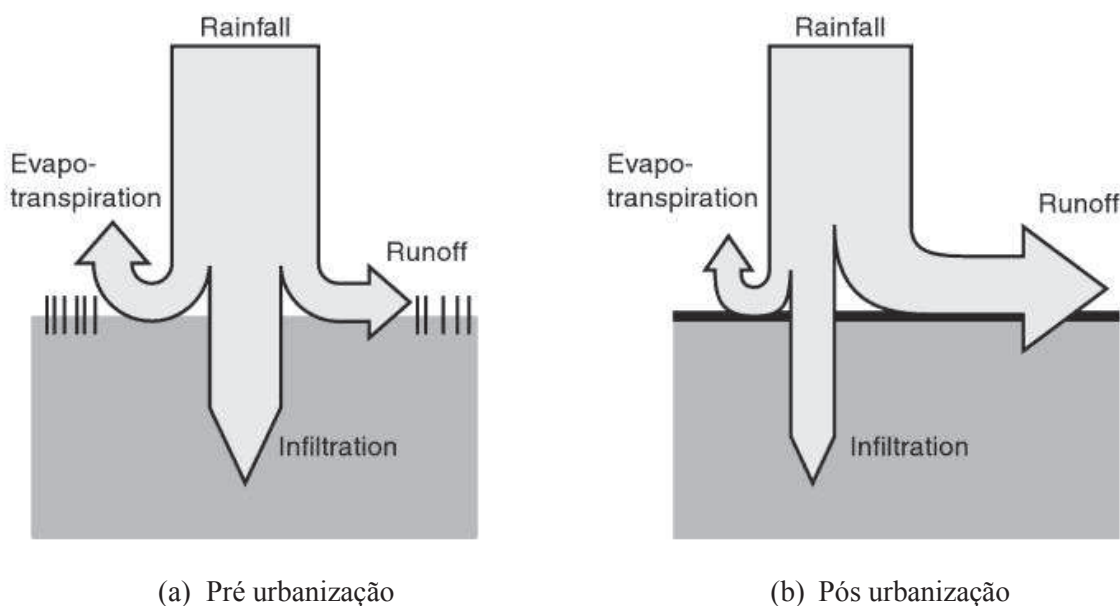


Fig. 2.4 – Efeito da urbanização no destino das águas da chuva (Butler and Davies 2011)

O desenvolvimento de uma área urbana, envolvendo a cobertura do solo por superfícies artificiais, possui um efeito significante neste processo, aumentando a quantidade do escoamento superficial em relação à infiltração, aumentando assim o volume total de água que atinge os rios durante ou logo a seguir ao período de precipitação (Fig. 2.4 (b)). O escoamento superficial ganha mais velocidade sobre pavimentos rígidos e quando transportado pelos sistemas de esgotos do que quando escorre por superfícies ou ribeiras naturais. Isto significa que o caudal vai ser escoado até ao seu destino e vai desaparecer da superfície mais rápido e portanto, o pico de caudal vai ser ainda maior (Fig. 2.5). Sendo assim, uma reduzida infiltração, significa que vai haver menos reservas de águas freáticas.

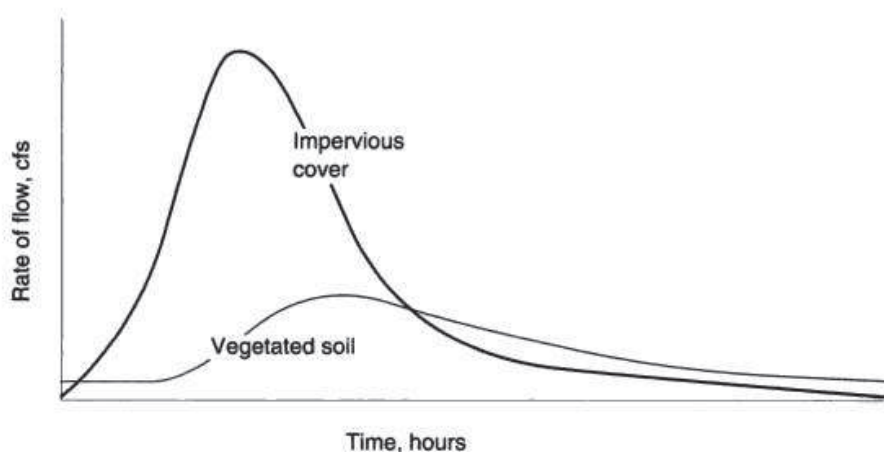


Fig. 2.5 - Contraste entre os caudais de um escoamento num solo com vegetação e numa superfície impermeável (Ferguson 1998)

Este facto aumenta o perigo de cheias repentinas nos rios, tendo também forte implicação na qualidade da água. O rápido escoamento superficial das águas pluviais é susceptível de transportar poluentes para os rios, em forma de sedimentos ou gorduras/óleos, provenientes da lavagem das superfícies pelas quais as águas escorreram até aí chegarem. Num ambiente artificial, existem provavelmente mais poluentes na superfície de captação e no ar, do que existiriam num ambiente natural. Ainda contribui numa maior escala para a poluição dos rios, as águas que aí desaguam provenientes de sistemas mistos de drenagem, visto transportarem também os poluentes das águas residuais.

A existência de águas residuais em quantidades significativas, são também uma consequência da urbanização. Grande parte dessa água não foi muito suja pelo seu uso. Assim como é normal num país desenvolvido abrir uma torneira para encher um lavatório, também é natural puxar a tampa para fazer a água “desaparecer”. A água é usada como o principal meio de eliminação de resíduos corporais e diferentes quantidades de lixo das casas de banho. Num sistema desenvolvido, muito do material adicionado à água enquanto esta está a ser transformada em águas residuais é removido nas estações de tratamento de águas residuais, antes da mesma ser devolvida ao ciclo urbano da água. A própria natureza seria capaz de tratar alguns tipos de material das águas residuas, como resíduos corporais, mas não nas quantidades geradas pela urbanização. A proporção de material que necessita de ser removido vai depender, em parte, da capacidade que o rio possui para assimilar a parte que lá permanece.

Portanto, os efeitos gerais da urbanização na drenagem de águas pluviais (Fig. 2.6), ou o efeito de substituir uma drenagem natural por um sistema de drenagem artificial, são a produção de picos súbitos no caudal dos rios, a introdução de poluentes e a necessidade de introduzir um sistema de tratamento artificial de águas residuais. (Butler and Davies 2011)

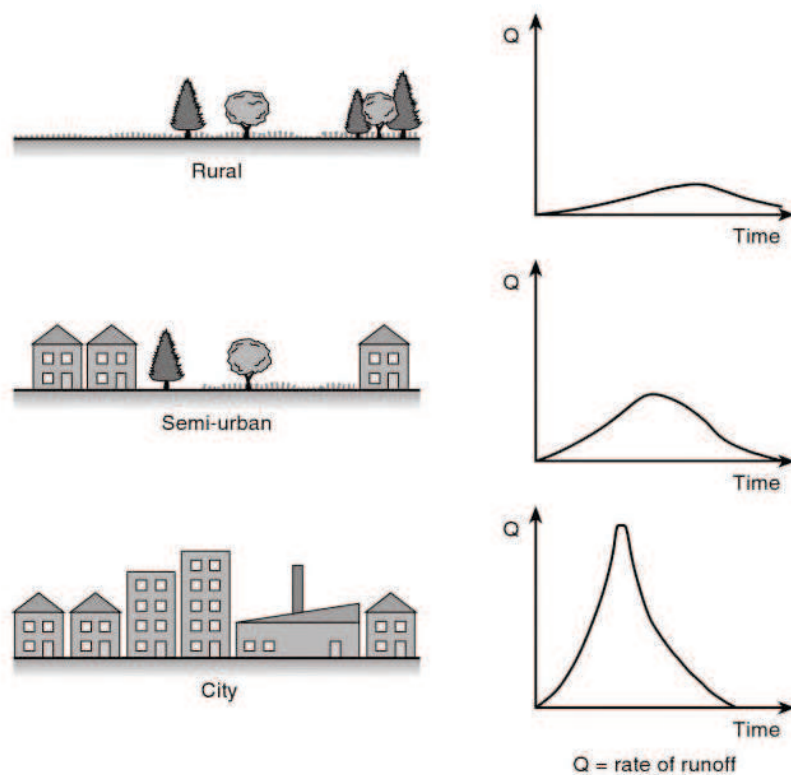


Fig. 2.6 - Efeito da urbanização no pico do caudal do escoamento superficial



## 2.4 Tipos de construção de exutores

Na sua maioria os exutores para esgotos são construídos debaixo de terra, podendo ser construídos na generalidade de uma das seguintes formas:

- Construção com escavação de valas (*open-trench*);
- Construção em túnel (*tunnelling*);
- Construção sem abertura de valas (*trenchless*).

A construção com recurso a valas escavadas, consiste numa escavação vertical ao longo da linha do exutor criando uma espécie de uma trincheira. Seguidamente os tubos são aí colocados, sendo posteriormente reposta a terra por cima destes, por forma a tapar a vala escavada (Fig. 2.7). É um método aplicável a uma vasta gama de tamanhos de tubos e de profundidades de colocação, sendo comum para uma construção de exutores de pequena a media escala.



Fig. 2.7 – Construção de um exutor com abertura de vala (Kana Pipeline 2011)

Tanto a construção em túnel, como a construção sem abertura de valas, requerem escavações verticais num determinado local de acesso de onde, posteriormente, segue a escavação com a inclinação apropriada de modo criar o espaço para onde o exutor será construído.

A construção em túnel normalmente envolve um tamanho de larga escala, suficiente para o acesso humano com um suporte construído dentro da escavação, podendo eventualmente fazer parte da conduta fabricada. Os túneis tendem a ser associados a projectos de larga escala, como interceptores de esgotos.

A técnica de construção que envolve a introdução de tubos no solo sem a necessidade da abertura de valas é a terceira técnica que pode ser utilizada para a construção de exutores, conhecida na gíria inglesa como *trenchless* ou método “*no-dig*”. São métodos que evitam a perturbação da superfície e têm-se tornado cada vez mais populares com o desenvolvimento da tecnologia, uma vez que os engenheiros têm cada vez mais consciência dos custos que uma construção com abertura de valas

acarreta para a os negócios e para a sociedade. Este método é tanto usado para a construção de novos exutores, como também é largamente utilizado para a reabilitação de condutas já existentes (Fig. 2.8). (Butler and Davies 2011)

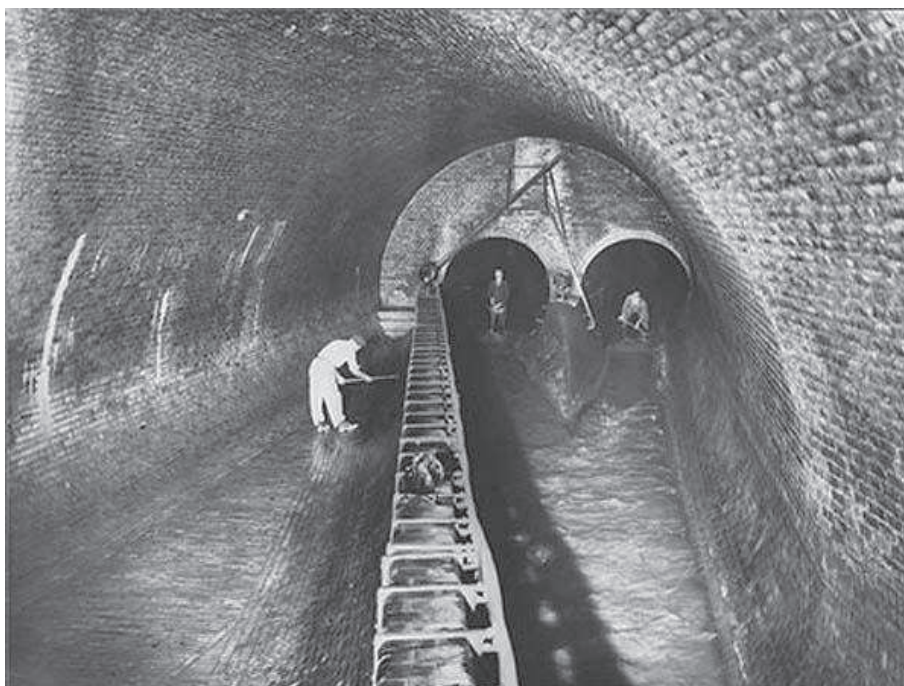


Fig. 2.8 – Interceptor de esgostos de Brighton em 1939 (SubterraneaBritannica 2008)

#### 2.4.1 Construção com escavação de valas (*open-trench*)

##### 2.4.1.1 Escavação

Em áreas urbanas, todas as escavações têm que ser executadas com todo o cuidado, de modo a não danificar as infra-estruturas já existentes no local que em algumas zonas se encontram densamente instaladas. A sua localização deve estar indicada em planos realizados pela autoridade responsável e onde forem necessários, os desvios devem ser executados com antecedência. Todavia, existem sempre problemas com a localização exacta das infra-estruturas existentes, daquelas que são desconhecidas, omitidas ou incorrectamente localizadas nos planos. Contudo, existem métodos, não intrusivos, para detecção destas infra-estruturas, sendo os dois métodos mais comuns o Localizador Electromagnético (EML) e o Radar de Prospecção Geotécnica (GPR), podendo necessitar de pequenas escavações de apoio para os por em prática(Read 2004).

No Decreto Regulamentar n.º 23 de 1995, podem ser encontradas as disposições construtivas para a abertura de valas, nomeadamente as suas larguras. As larguras das valas estão regulamentadas da seguinte maneira:

- Para profundidades de assentamento de condutas inferiores a 3 m, a largura mínima da vala escavada deverá exceder o diâmetro exterior da conduta em 0,50 m, para diâmetros até 0,50 m; e deverá exceder em 0,70 m, o diâmetro exterior, se este for superior a 0,5 m;
- Se a profundidade de assentamento for superior a 3 m, a largura da vala a escavar pode aumentar face ao definido em cima, em função do tipo de terreno, processo de escavação e localização do nível freático. (Decreto Regulamentar n.º 23/95)

Como suporte temporário das valas, o sistema mais comum utilizado consiste em colocar pranchas metálicas verticais contra as paredes da vala, suportadas por vigas de madeira horizontais unidas por escoras metálicas na direcção transversal ao sentido de desenvolvimento da vala. As pranchas metálicas podem ser colocadas de forma contínua ou com um certo espaçamento, dependendo das condições do solo e do nível freático. Por outro lado também são utilizadas estruturas pré-fabricadas de suporte que podem ser movidas com o avanço do processo de escavação, colocação das condutas e reposição de terras.

## 2.4.2 Construção em túnel (*tunnelling*)

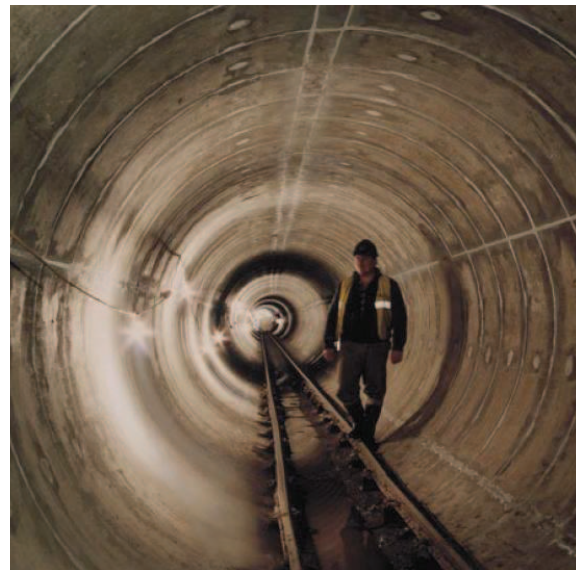
### 2.4.2.1 Suporte

Os métodos comuns de suporte de túneis conseguem suportar as cargas nas mais variadas condições, embora possam ser colocados suportes para cargas superiores, onde forem necessários. Durante a construção, as cargas aplicadas podem ser mais críticas do que as instaladas após a construção do exutor.

Em exutores em túnel é comum existir um suporte primário, geralmente constituído por segmentos pré-fabricados de betão pregados (Fig. 2.9 (a)), por forma a suportar a construção e as cargas permanentes, e um suporte secundário, normalmente constituído por betão colocado *in situ*, funcionando como revestimento que conferirá condições hidráulicas adequadas, por tornar as paredes mais lisas. Em alternativa, sendo cada vez mais utilizado um suporte primário constituído por segmentos pré-fabricados de betão com acabamento liso (Fig. 2.9 (b)), de modo a não ser necessário um revestimento para conferir as características hidráulicas necessárias.



(a)



(b)

Fig. 2.9 – Suporte primário de segmentos de betão pregados (BuchanConcreteSolutions 2011)

#### 2.4.2.1.1 Suporte primário

Um suporte primário de betão pré-fabricado é constituído por segmentos que são unidos *in situ*, de forma a criarem um anel contra a área escavada. A área escavada, é ligeiramente superior à área



exterior do anel formado pelos segmentos de betão, sendo o espaço formado entre eles, posteriormente preenchido por argamassa injectada através de aberturas existentes nas peças pré-fabricadas.

Os segmentos *standard*, utilizados são compostos por nervuras na sua estrutura, não sendo por isso adequados para transportar fluidos no seu interior. De modo a preencher os painéis negativos entre as nervuras do suporte podem ser utilizados blocos especiais de betão, embora o método mais utilizado seja adicionar um suporte secundário já com o alisamento necessário para o transporte hidráulico.

#### 2.4.2.1.2 Suporte secundário

A colocação de betão *in situ* como suporte secundário é realizada através da injeção com cofragem circular deslizante. Em alternativa, são utilizados revestimentos pré-fabricados de fibra de vidro ou de compósito de betão armado com fibras, sendo o espaço entre este suporte secundário e o primário, preenchido por argamassa.

#### 2.4.2.2 Tratamento do solo e controlo do nível freático

Na construção de exutores podem ser utilizadas técnicas de tratamento do solo com o objectivo de estabilização do solo ou para controlar o nível freático. Os tratamentos mais comuns são a injeção de argamassa ou químicos e a congelação de solos.

Ao nível das paredes do túnel o nível freático pode ser ainda controlado com o recurso a ar comprimido.

##### 2.4.2.2.1 Bombagem em poços

A água é bombada através de poços de modo a rebaixar as águas dos lençóis freáticos na área de construção do túnel.

##### 2.4.2.2.2 Injeção de argamassa ou químicos

Esta é uma técnica aplicada para reduzir a permeabilidade dos solos ou para aumentar a resistência de solos pouco coesivos. As injeções são realizadas através de furos executados a partir da superfície ou das paredes do túnel.

##### 2.4.2.2.3 Congelação de solos

Neste caso a temperatura do solo é baixada de tal forma que a água aí existente fica congelada durante a construção. Isto é conseguido através de refrigeração por um circuito de tubos colocados no solo, por onde circulam fluidos, geralmente salmoura ou azoto líquido.

##### 2.4.2.2.4 Ar comprimido

A água existente no solo pode ser mantida fora do túnel pelo balanço de pressões hidrostáticas com ar comprimido dentro deste. Normalmente as pressões necessárias são inferiores a uma atmosfera,

podendo em certos casos superar este valor. A secção do túnel sob pressão está selada por câmaras de trabalho munidas de válvulas que não permitem o retrocesso do ar, sendo nestas câmaras que se encontram os trabalhadores e os materiais. O fornecimento de ar deve ser realizado de forma contínua, uma vez que parte do ar pode perder-se pelo interior do solo.

#### 2.4.2.3 Escavação

Os túneis são conduzidos por poços de acesso, normalmente com profundidades equivalentes do lado de montante e de jusante.

O solo pode ser escavado por uma tuneladora ou por meios manuais de escavação com ajuda de ferramentas pneumáticas. A rocha normalmente é desmontada com recurso a furos e explosivos. Se o maciço não for competente a fim de se suportar durante a instalação do suporte primário, é necessário recorrer a um escudo, que é empurrado a partir do suporte primário anteriormente instalado, usado como um suporte contínuo. Uma tuneladora pode combinar as funções de escudo e meio de escavação mecânico em simultâneo.

A escavação dos poços de acesso é realizada na vertical, mecânica ou manualmente, sendo o solo suportado normalmente, por segmentos pré-fabricados de betão, de modo análogo aos usados no interior do túnel. Geralmente estes poços de acesso tornam-se câmaras de visita dos exutores quando terminada a construção do túnel.

#### 2.4.3 Construção sem abertura de valas (*trenchless*)

A escolha entre uma construção com abertura de valas ou pelo método tradicional de túnel, pode ser decidida pelos factores: facilidade e custo de construção. Além de um determinado diâmetro e profundidade, é mais barato escavar em vala e voltar a tapar, do que executar um túnel. Por outro lado, o método de construção sem recurso a vala torna-se uma alternativa viável à tradicional com abertura quando se adiciona o factor de não se poder afectar a superfície por trabalhos que requeiram a interrupção do trânsito ou de outras infra-estruturas que afectem o bom funcionamento de actividades comerciais ou o dia-a-dia das pessoas.

O método *trenchless*, é também aplicado normalmente a outros campos de condutas, como óleo e gasodutos, para os quais esta técnica foi inicialmente desenvolvida. Alguns países têm contribuído para um desenvolvimento activo deste método desde o passado, entre os quais o Japão, a Rússia, os Estados Unidos e a Alemanha.

##### 2.4.3.1 Pipe jacking

Macacos hidráulicos são utilizados para empurrar tubos fabricados especialmente para este efeito (sem saliências e resistentes o suficiente para resistir às forças de empurre) pelo espaço escavado no solo. Na frente dos tubos encontra-se um escudo onde ocorre a escavação, que pode ser realizada por uma tuneladora ou por meios manuais. Os macacos ganham reacção para empurrar os tubos numa parede de impulso construída para o efeito. (Fig. 2.10)

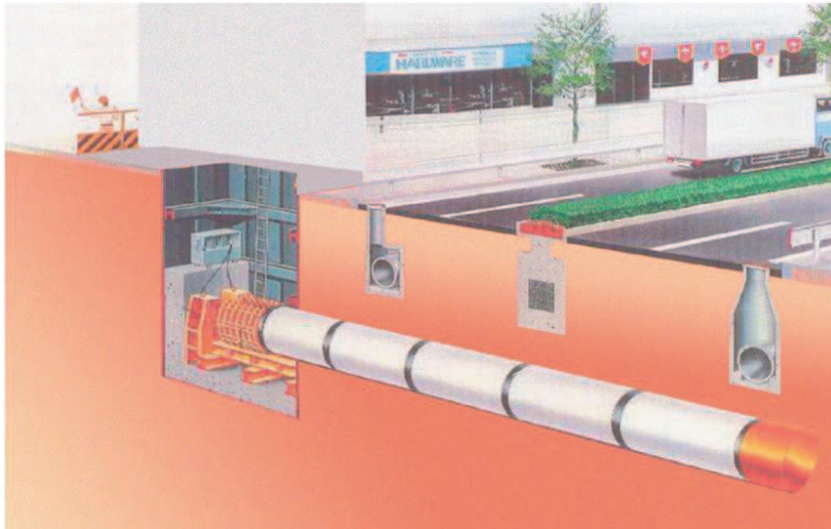


Fig. 2.10 – Pipe jacking (ServicesFirstLimited 2011)

#### 2.4.3.2 Microtúneis (*microtunnelling*)

É um método em todo igual ao pipe jacking, aplicado a tubos com diâmetro inferior a 900 mm. Neste caso, a escavação é realizada por meios exclusivamente mecânicos, sem mão-de-obra humana, controlados por equipamentos remotamente.

#### 2.4.3.3 Thrust auger boring

O solo é removido da frente escavada por um trado ao mesmo tempo que os tubos são empurrados para o interior do espaço escavado. Este é um método considerado bastante impreciso, pelo que é utilizado apenas para pequenas distâncias. (Fig. 2.11)



Fig. 2.11 – Thrust Auger Boring (Hidrossolo 2006)

#### 2.4.3.4 Furação direccional (HDD)

Um furo piloto é executado por um tubo perfurador guiado de pequeno diâmetro, sendo o furo posteriormente alargado até ao diâmetro desejado, por uma escavação mecânica. (Fig. 2.12)

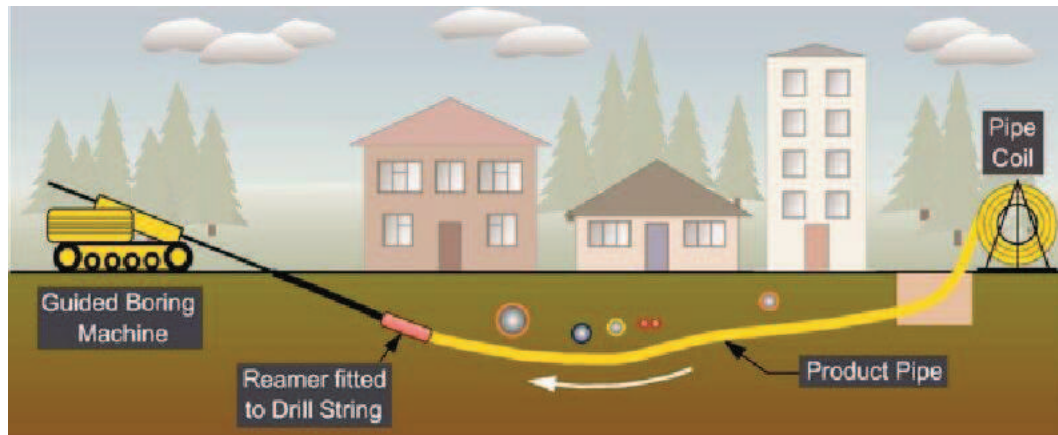


Fig. 2.12 – Furação direccional (ASTT 2010)

#### 2.4.3.5 Perfuração por percussão (*Impact moling*)

Uma sonda de perfuração é usada com um mecanismo de percussão, criando um buraco no solo empurrando este para fora. Os tubos são posteriormente empurrados para o espaço aberto. É normalmente utilizado para pequenos diâmetros e pequenas distâncias. (Fig. 2.13)

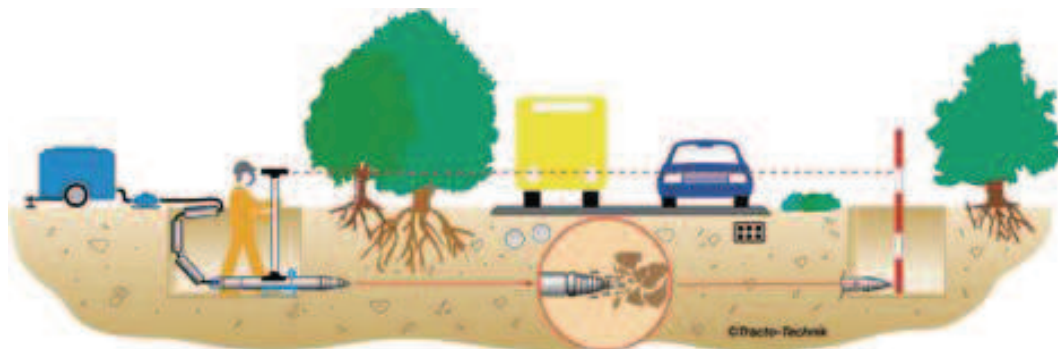


Fig. 2.13 – *Impact moling* (TrenchlessWorld 2009)

#### 2.4.3.6 *Pipe ramming*

É em tudo parecido com a técnica de pipe jacking, com a diferença de utilizar tubos metálicos em vez de tubos de betão. Os tubos metálicos são empurrados contra o solo por macacos hidráulicos, sendo o solo no interior dos tubos removido durante o processo ou depois de toda a cravação completa. A remoção do solo pode ser feita com o recurso a ar comprimido, água, ou usando meios mecânicos ou manuais. (Fig. 2.14)

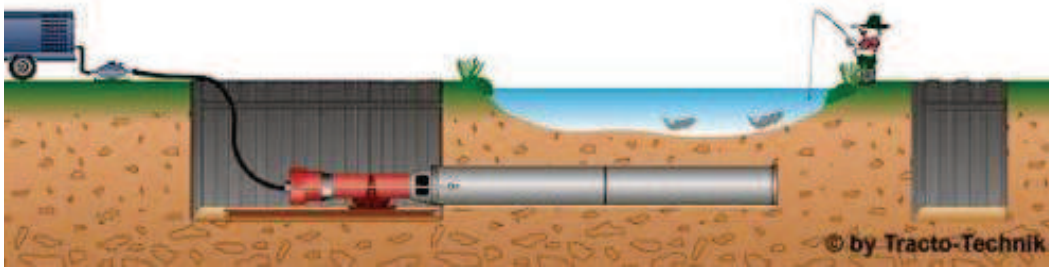


Fig. 2.14 – Pipe ramming (TT-Group 2011)

## 2.4.4 Tubos utilizados nas condutas

### 2.4.4.1 Generalidades

O tamanho nominal de um tubo (DN) é o seu diâmetro expresso em milímetros arredondado por excesso ou por defeito, de acordo com um valor referência conveniente. Em alguns materiais, como os cerâmicos e o de betão, DN refere-se ao diâmetro interior e noutros materiais, como os plásticos, refere-se ao diâmetro exterior. O diâmetro real é ligeiramente diferente do DN, embora nos dados do fabricante dos tubos, o diâmetro preciso tem que estar claro, visto que é usado em cálculos precisos de propriedades hidráulicas ou estruturais.

### 2.4.4.2 Materiais

Em geral as características físicas mais importantes do material de um tubo para um exutor são:

- Durabilidade;
- Resistência à abrasão;
- Resistência à corrosão;
- Impermeabilidade;
- Resistência a forças aplicadas.

Para além dos materiais apresentados seguidamente, podem ser encontrados tubos de polietileno, fibra de vidro (GRP ou GFRP) e fibrocimento. Também existem exutores já construídos, feitos em alvenaria. (Butler and Davies 2011)

#### 2.4.4.2.1 Cerâmicos

Os tubos cerâmicos, normalmente de barro/argila vitrificada, são geralmente usados para tubos de pequeno a médio diâmetros. As suas maiores vantagens são a resistência às forças aplicadas e a resistência à corrosão, o que os torna adequados para serem utilizados em águas residuais. Contudo a cerâmica é pesada e frágil, sendo portanto tubos susceptíveis a danificar-se no seu manuseamento, armazenamento e instalação.

#### 2.4.4.2.2 Betão

Tubos de betão simples, armado ou pré-esforçado são normalmente usados de médio a grandes diâmetros. São normalmente adequados a serem utilizados para exutores de águas pluviais pelo seu



diâmetro, resistência à abrasão, resistência a forças aplicadas e pelo seu custo. Têm um potencial de corrosão, embora as águas residuais domésticas não sejam, no geral, nocivas com as tubagens de betão. Estão disponíveis tubos com secções transversais não circulares. Um tipo de tubos de betão pré-esforçado é feito para aplicações que envolvem determinadas pressões em serviço.

#### 2.4.4.2.3 Ferro fundido dúctil

Os tubos de ferro fundido dúctil são utilizados quando estão instaladas pressões internas significantes, como em redes de bombagem e sifões invertidos, ou onde é requerida alta resistência, como em situações de elevadas pressões de terras e em exutores superficiais. O ferro fundido é susceptível à corrosão, precisando de protecção como revestimento de zinco, pintura betuminosa ou protecção com mangas de polietileno.

#### 2.4.4.2.4 Aço

Tubos de aço, tendem a ser utilizados em aplicações especiais, nas quais é requerida alta resistência. Normalmente em emissários marítimos, exutores superficiais e pontes para tubos. Estes tubos requerem protecção à corrosão, por uma camada de revestimento interior e exterior, normalmente com recurso à galvanização.

#### 2.4.4.2.5 PVC-U

Os tubos de policloreto de vinilo não plastificado (PVC-U) são utilizados com diâmetros pequenos. São tubos leves, possibilitando uma instalação mais simples e com resistência à corrosão. Contudo, como são tubos flexíveis, a sua resistência depende do apoio aonde assentam, sendo portanto fundamental uma boa prática construtiva. Diâmetros pequenos são normalmente utilizados em sistemas de drenagem prediais, mas também são usados em certo ponto em exutores públicos. Como reforço externo, os tubos de PVC-U utilizam uma forma especial da parede, por forma a aumentar a rigidez para o mesmo volume de material.



# 3

## PIPE JACKING

### 3.1 Introdução à técnica

A técnica de construção de túneis com anéis empurrados é também denominada, na nomenclatura mundial, por *pipe jacking*, sendo este o termo pela qual a técnica é predominantemente conhecida.

Esta técnica é utilizada para a construção de túneis de pequenos diâmetros, geralmente para a instalação de gás e oleodutos, condutas de drenagem e de esgotos, infra-estruturas de passagem de cabos de electricidade ou telecomunicações, passagens inferiores de peões ou passagens hidráulicas tipo *coulverts*. É utilizada para instalar os sistemas supracitados sob ruas movimentadas de áreas urbanas, auto-estradas, linhas de caminhos-de-ferro, aterros, aeroportos ou sob outras estruturas sensíveis a perturbações da superfície. A diferença entre o *pipe jacking* e a técnica de micro túneis (*microtunnelling*), reside no facto de na primeira serem utilizados tubos de diâmetro superior a cerca de 900 mm (túneis em que possam entrar humanos) e na segunda os túneis possuírem diâmetros inferiores a este valor (valor de referência que pode diferir de um país para outro). (Thomson 1993)

Os métodos de construção em *pipe jacking* são passíveis de serem empregues em solos coesivos e não coesivos, em solos com ou sem a presença de águas freáticas, sendo as técnicas de escavação capazes de actuar sobre solos com rochas ou solos mistos, com seixos e cascalho.

De um modo geral é um método para instalação de segmentos de tubos rígidos, horizontalmente, abaixo da superfície, em situações que não permitam ou que não tornem viável a instalação de equipamentos com recurso a abertura de valas. Sendo, muitas vezes o *pipe jacking* referido como o método *trenchless*, enquanto exemplo de uma execução desse método, existem outras técnicas de *trenchless* como as referidas no ponto 2.4.3.

A instalação dos segmentos no solo é obtida com o recurso a macacos hidráulicos de grande capacidade (facto pelo qual a técnica se denomina de *pipe jacking*) que vão empurrar estes segmentos em direcção ao solo, à medida que este vai sendo escavado com a protecção de um escudo que segue na frente dos tubos empurrados. A execução do túnel pode ser guiada por tecnologia laser, se a escavação não for tripulada, ou pode ser manual, caso se recorra a uma escavadora com tripulação humana.

No que diz respeito ao limite de comprimento de túneis realizados com *pipe jacking*, não existe um limite teórico, embora existam restrições que possam ser impostas, quer por critérios económicos, quer por considerações práticas no campo da engenharia. Túneis com centenas de metros já foram construídos com esta técnica, tanto em troços rectos como em troços com curvaturas radiais, sendo a gama de diâmetros aplicada na ordem dos 150 mm aos 3000 mm.

Construtivamente, esta técnica proporciona tolerâncias comparáveis às obtidas com outras técnicas de execução de túneis, pois normalmente requer menos sobre escavação, assegura o suporte do solo escavado e conseqüentemente reduz a possibilidade de deslocamentos ao contrário das outras técnicas.

Os meios mecânicos de escavação utilizados são semelhantes aos utilizados nos outros formatos de construção de túneis, podendo ser utilizados escudos protectores (*shields*), para protecção de escavação e da frente de escavação, dependente das condições geológicas e hidrológicas do terreno.

Esta técnica requer a construção de poços de ataque ou de impulso (*starting* ou *thrust pits*), onde se inicia o empurre dos tubos e a construção de poços de recepção ou alvo (*reception* ou *target pits*), para onde se dirige o túnel, no qual vai ser recebida e/ou recolhida a maquinaria de escavação. Normalmente estes poços localizam-se em pontos de possíveis câmaras de visita das condutas, salvo em situações técnicas que obriguem a construção de poços intermédios de auxílio à construção, que podem não se localizar num ponto de uma câmara prevista. As dimensões dos poços podem variar consoante diversos factores, sejam eles económicos, funcionais (caso sejam de ataque, intermédios ou de recepção) ou técnicos (variando com o tipo de escavação utilizado).

De modo a proporcionar apoio e respectiva reacção aos macacos que empurram os tubos, é necessário construir um maciço de reacção nos poços de ataque onde a construção é iniciada, ou onde cada trecho é iniciado. No caso de o poço ter sido escavado em terreno pouco competente e este não possuir capacidade de resistir aos impulsos de reacção dos macacos, a capacidade de reacção dos maciços pode ser enriquecida por intermédio de estacas ou outro meio que promova o mesmo efeito. Nos casos em que a profundidade do poço de ataque não permita a construção de um maciço de reacção suficiente, como o caso de atravessamento de aterros, a reacção dos macacos terá de ser obtida por intermédio da estrutura de suporte do poço, estrutura esta que terá que possuir os apoios necessários por intermédio de estacas, ancoragens ou outros métodos capazes de transmitir as forças horizontais geradas.

Como forma de assegurar a correcta transmissão de forças de empurre ao longo da circunferência do tubo a ser empurrado, são utilizados anéis de impulso, munidos de macacos internos, entre os tubos. Os macacos dos anéis de impulso e os que se situam no poço de ataque encontram-se interligados no circuito hidráulico, por forma a garantir que o impulso gerado por cada um seja o mesmo. O número de anéis a utilizar é função do diâmetro dos tubos, da resistência dos tubos, da distância do túnel e da resistência friccional prevista.

O alinhamento dos tubos a serem empurrados é conseguido pelo posicionamento correcto de guias correctamente orientadas, montadas no poço de ataque, onde os tubos são recebidos. Este alinhamento é mantido ao longo do processo de *pipe jacking*, utilizando um escudo direccional de escavação, cuja posição é frequentemente verificada e nivelada com base numa referência fixa. Em trechos pequenos e simples, estas verificações podem ser realizadas com recurso a equipamentos topográficos. Escavações rápidas e técnicas controladas remotamente requerem sistemas sofisticados de posicionamento electrónico, usando a combinação de tecnologia laser e técnicas de monitorização computacional.

Há situações em que os túneis são realizados abaixo do nível freático, utilizando uma parede de encabeçamento com vedante em cada poço de ataque e de recepção, por forma a prevenir a entrada de água freática e conseqüente fluxo de terras para o interior do poço, bem como reter o lubrificante anelar usado na construção no interior do solo. (PJA 1995)

Uma construção com o método de *pipe jacking*, bem-sucedida, pode ser comparada a uma corrente que é tão forte como o elo mais fraco da mesma. Tal como no lançamento de um satélite em que todos

os componentes têm de ser bem estudados e desenvolvidos, de modo a criar um engenho final bem projectado, também em termos de *pipe jacking*, o mesmo tem de se suceder, por forma a proporcionar o melhor método de construção em túnel de condutas em termos de critérios estruturais, de flexibilidade e de impermeabilidade à água. (Roe 1995)

### 3.2 Elementos de *pipe jacking*

De acordo com alguma bibliografia a definição *pipe jacking* é um método de instalação de um suporte, sendo os outros elementos à volta deste tipo de construção (o *shield*, a escavação e o transporte de despojos) semelhantes a outras formas de construção de túneis com recurso a tuneladora. Na prática, é a integração num sistema equilibrado de todas as actividades de controlo da frente, escavação, remoção de despojos e instalação de suporte/revestimento, que faz do *pipe jacking* um método na vanguarda da instalação de todos os tipos de tubos.

As operações de *pipe jacking* assentam em quatro zonas: a face de escavação, o curso do túnel, o poço de ataque e a zona de equipamentos à superfície (Fig. 3.1). (Thomson 1993)

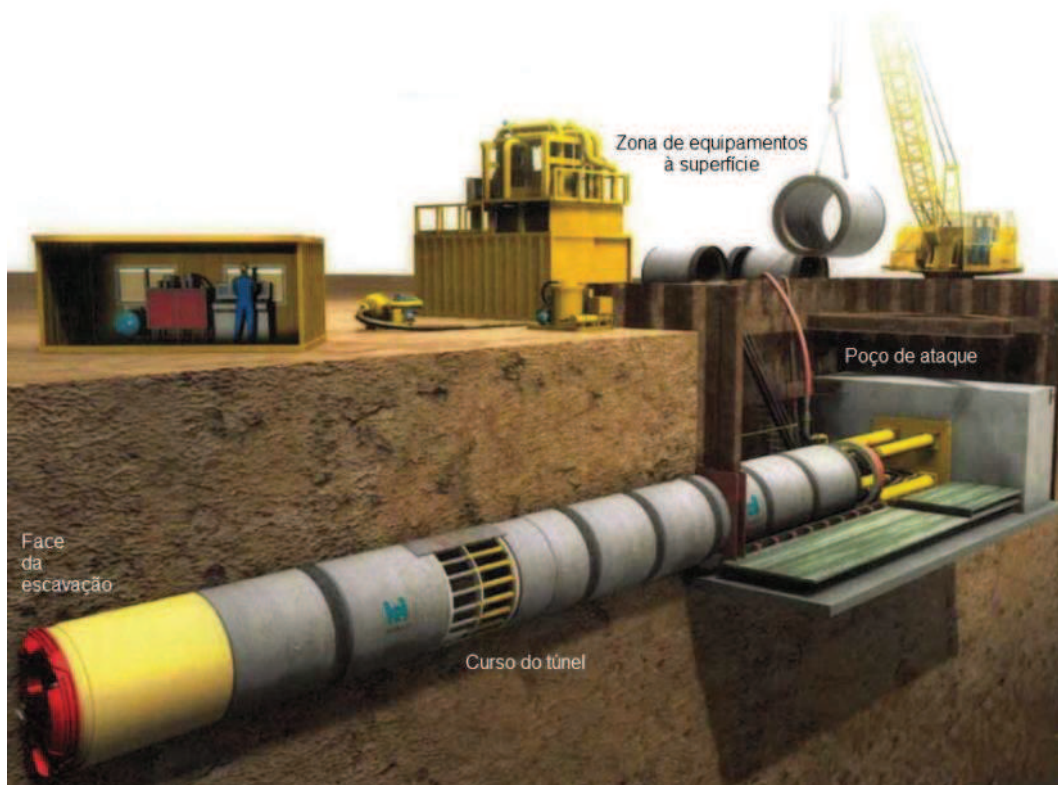


Fig. 3.1 – Zonas de *pipe jacking*, adaptado de (HOBAS 2010)

#### 3.2.1 Face de escavação

As actividades que decorrem nesta zona de trabalhos consistem em: escavação e estabilização do solo, carregamento do solo escavado a ser transportado para o exterior e monitorização, ajuste do alinhamento e nivelamento do túnel. Estas actividades acontecem no interior de um escudo ligado ao tubo guia, o primeiro a ser instalado, do sistema. Este escudo pode variar, desde um simples escudo com uma cabeça de corte de aço acoplada ao tubo guia, até uma desenvolvida tuneladora de equilíbrio

de terras por intermédio de lamas bentoníticas, com um sistema computadorizado automático de monitorização e posicionamento.

O escudo (*shield*) utilizado assegura uma fronteira de corte rígida para o tamanho necessário dos tubos a instalar, um lugar seguro onde trabalhar, um suporte para equipamentos de escavação mecânica ou de suporte da frente, um local para monitorização de alinhamento e nivelamento, um meio de ajuste direccional de modo a corrigir o alinhamento e o nivelamento do avanço dos trabalhos.

A utilização de escudo permite a entrada em segurança de pessoas para o interior da escavação, por forma procederem a um controlo mais próximo do local ou para executarem os trabalhos de escavação, em situações em que o desenvolvimento do túnel seja relativamente curto e se encontre acima do nível freático. Nos casos em que o curso do túnel é extenso, são introduzidos meios mecânicos de escavação no interior do escudo protector. Quando o túnel é desenvolvido em solos potencialmente instáveis e abaixo do nível freático, recorre-se à utilização de técnicas de equilíbrio de pressões controladas remotamente com ajuste automático por computador.

### 3.2.2 Curso do túnel

O curso do túnel pode desempenhar variadas funções, não só depois de concluída a construção, mas também durante a mesma.

Durante a execução dos trabalhos, o curso do túnel fornece o suporte necessário ao mesmo, transmite as forças de empurre sem estragos, proporciona a passagem de trabalhadores até ao escudo. Em sentido contrário é o caminho para o transporte do material escavado, desde a frente do túnel até ao poço de ataque e funciona como caminho para fazer chegar o equipamento necessário ao escudo.

Finda a execução dos trabalhos, este funciona como suporte permanente, projectado para conferir a resistência necessária ao túnel e garante as condições de estanquidade e durabilidade aos tubos, para desempenharem a sua função.

Os tubos e os revestimentos, que são empurrados por forma a formarem o suporte do túnel, são os elementos mais importantes do curso, podendo ser instalados de três formas:

- Num passo simples (*single-pass*), em que o tubo empurrado desempenha a função de suporte permanente;
- Num passo duplo (*double-pass*), em que um revestimento temporário é instalado numa primeira instância, sendo posteriormente empurrado para o exterior no mesmo sentido, pelos tubos definitivos;
- No interior de um sistema de revestimento (*casing system*), em que os tubos definitivos são colocados dentro de um invólucro exterior, sendo preenchido o espaço anelar entre os dois.

Um sistema *double-pass* é utilizado quando a conduta instalada num passo simples não cumpre as especificações requeridas, por exemplo, quando se pretende um túnel destinado à passagem de telecomunicações em que é pretendido um caminho de condutas múltiplas.

Os *casing systems* são sobretudo utilizados em passagens inferiores de caminhos-de-ferro, por um lado pela sua tradição e por outro, como um factor de segurança, uma vez que os invólucros empurrados antes dos tubos finais, providenciavam um grau de tolerância, na altura em que a técnica de *pipe jacking* ainda não era tão sofisticada. Contudo, os seus benefícios em termos de segurança são por vezes superados por outros problemas.



Um esquema de um curso tipo de um túnel e suas partes constituintes, pode ser observado na Fig. 3.2.

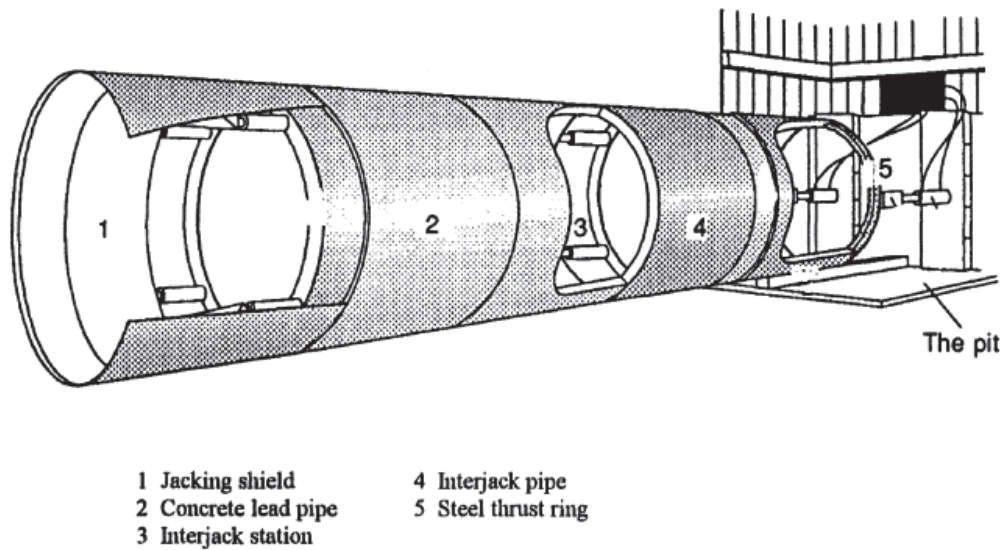


Fig. 3.2 – Curso de um túnel (Thomson 1993)

### 3.2.2.1 Tubos a utilizar (*jacking pipes*)

Os tubos a serem utilizados na formação das condutas que se pretendem construir têm de ser resistentes o suficiente para aguentarem as forças de empurre aplicadas pelos macacos hidráulicos aquando da sua instalação, bem como para resistirem às forças envolventes, resultantes do estado de tensão do solo onde estão a ser inseridos.

De acordo com a sua função existem dois tipos de tubos, que vão diferir em questões de uso e de instalação, sendo uns tubos de protecção e outros tubos de produção. Os tubos de protecção são instalados de modo a actuarem como suporte do troço do túnel e poderem receber os tubos de produção no seu interior, sendo adequados para este efeito a maioria dos tubos para empurre disponíveis no mercado. O uso de tubos de protecção com os tubos de produção no interior é regido por critérios económicos, uma vez que os tubos de protecção ficam no solo depois de concluída a instalação e durante a vida da obra sem outra função, uma vez que a conduta de serviço vai ser formada pelos tubos de produção. A explicação da escolha deste tipo de instalação dupla e os casos onde normalmente é aplicada, já foi referida no ponto acima na parte do *casing system*.

No que respeita aos materiais nos quais são fabricados os tubos, estes podem ser dos mais variados tipos: betão simples e armado (Fig. 3.3), aço (Fig. 3.7), plástico (Fig. 3.6), fibra de vidro (Fig. 3.5), cerâmicos (Fig. 3.4), ferro fundido ou materiais compósitos (Fig. 3.8). Sendo os tubos de betão mais comumente utilizados em exutores, já em sistemas de abastecimento de água ou gás o mais comum é a utilização de tubos de aço. Para pequenos diâmetros geralmente são utilizados os tubos cerâmicos que são fabricados com uma gama de diâmetros que varia sensivelmente entre os 150 mm e os 700 mm.



Fig. 3.3 – Tubo de betão (UCM 2011)



Fig. 3.4 – Tubo cerâmico (Exponent 2010)



Fig. 3.5 – Tubo de fibra de vidro (GRP) (HOBAS 2011)



Fig. 3.6 – Tubo de plástico (egeplast 2011)



Fig. 3.7 – Tubo de aço (Permalok 2011)



Fig. 3.8 – Tubo composto de agregados e resina de poliéster POLICRETE® (Meyer 2011)

A escolha do material dos tubos a aplicar pode ser função do diâmetro, do comprimento do troço a instalar, das condições do solo ou do uso final da conduta. Tubos fabricados com materiais compósitos, como betão com fibras de vidro (GRP), são produzidos para condições excepcionais de utilização.

O fabrico dos tubos próprios para serem instalados com recurso à técnica de empurre deve seguir os critérios especificados na norma europeia EN 14457 “*General requirements for components specifically designed for use in trenchless construction of drains and sewers*”.

Sendo o betão o material mais adoptado para a construção deste tipo de tubos, e mais correntemente o armado, proporciona uma gama mais vasta em termos de diâmetros comerciais, podendo ser



encontrados tubos com diâmetros desde os 250 mm a 3000 mm, ou ainda superiores, caso seja necessário em situações específicas.

Os tubos de betão aramado podem ser fabricados de diversas formas, variando consoante as necessidades, em termos de projecto, no que diz respeito ao seu comprimento, espessura das paredes, forma dos tubos e quantidade de armadura. Os métodos pelos quais os tubos podem ser fabricados são por vibração, por vibração combinada com compressão, por vácuo, por centrifugação ou por rolamento. De acordo com a *The Pipe Jacking Association*, os tubos de betão em particular devem ser fabricados em concordância com a norma BS EN 1916 “*Concrete pipes and fittings, unreinforced, steel fibre and reinforced*” e para além de serem desenvolvidos para resistir às várias pressões neles actuantes, têm de ser impermeáveis à água, possuir alta resistência a agentes químicos e elevada resistência ao desgaste em serviço.

Os tubos fabricados em betão, estão disponíveis no mercado com comprimentos de cerca de 1,20 m a 2,50 m, sendo projectados para transmitirem as forças de empurre ao longo da sucessão de tubos sem danificar as juntas entre eles.

Na Tabela 3.1, apresentada em baixo, encontram-se os requisitos gerais para os tubos e os seus elementos de ligação utilizados em sistemas de drenagem de águas, de acordo com a norma EN 14457.

Tabela 3.1 – Requisitos gerais para tubos e elementos de ligação utilizados em sistemas de drenagem (EN 14457)

Eficiência hidráulica:	
Revestimento dos Tubos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rugosidade mínima das paredes</li> <li>• Perdas de carga mínimas na transição entre elementos</li> <li>• Qualquer aumento de resistência ao longo do tempo</li> </ul>
e	
Elementos de Ligação	
Resistência aos esforços mecânicos:	
Superfície dos Tubos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevado caudal</li> <li>• Sólidos transportados</li> <li>• Equipamentos de limpeza</li> <li>• Esforços externos</li> </ul>
e	
Corpo dos Tubos	
Resistência à acção química:	
Superfície dos Tubos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sustâncias inorgânicas (ácidos, sais, lixívias)</li> <li>• Substâncias orgânicas (solventes)</li> <li>• Reacções biológicas</li> <li>• Alteração da composição das águas residuais</li> <li>• Mudanças de temperatura e temperaturas máximas</li> </ul>
e	
Elementos de Ligação	
Resistência aos esforços térmicos:	
Corpo dos Tubos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estabilidade das propriedades dos materiais</li> <li>• Estabilidade da forma</li> <li>• Esforços resultantes das variações de temperatura</li> </ul>

### 3.2.2.2 Juntas entre tubos (*pipe joints*)

De acordo com a norma BS EN 1916, os tubos a serem empregues no método de empurre devem ser munidos de juntas flexíveis incluídas nas paredes dos tubos, podendo recorrer-se ao uso de um colar (Fig. 3.9 a) e b)) ou ser do tipo rebatidas (Fig. 3.9 c)), como se pode ver nos esquemas da Fig. 3.9 (as figuras representam três juntas tipo sem a representação de anéis vedantes na sua composição). Estas juntas devem ser projectadas de modo a incorporarem pelo menos um anel vedante no seu interior. Todas as superfícies das juntas que transmitirão as forças entre os tubos durante a sua instalação, devem ser planas e livres de irregularidades capazes de causar concentrações locais de elevado esforço. (BSEN-1916 2002)

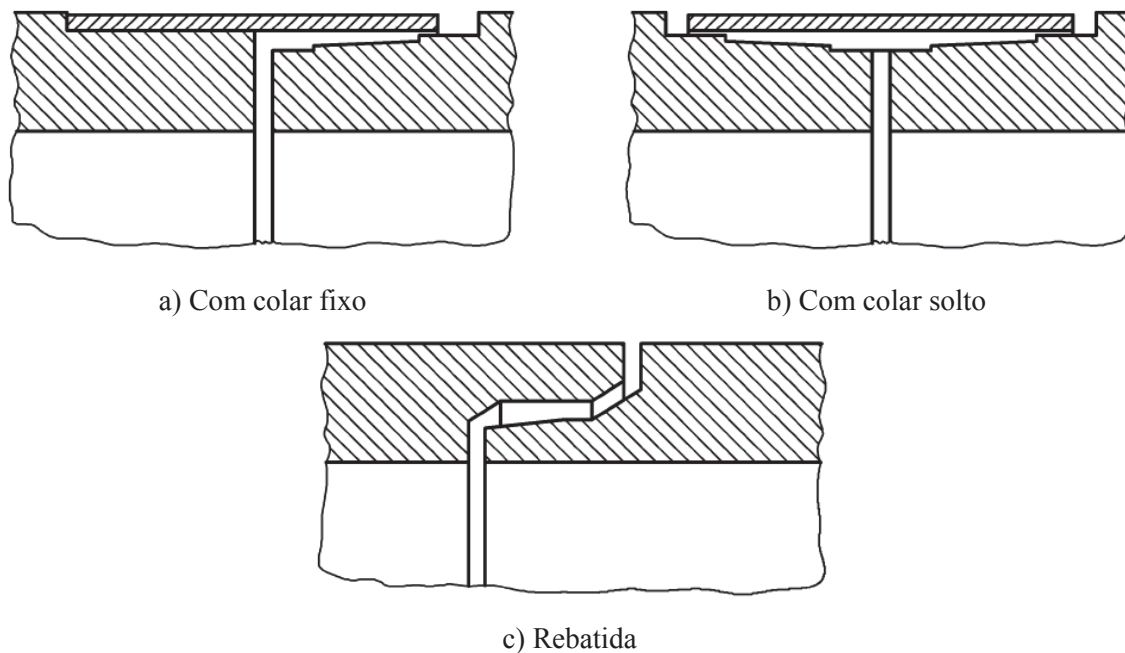


Fig. 3.9 – Esquemas de juntas tipo, para tubos de *pipe jacking* (BSEN-1916 2002)

As juntas têm que ser impermeáveis à água e resistir às pressões de projecto a que os tubos podem estar sujeitos. Devem ser formadas no interior da espessura das paredes dos tubos por forma a não proporcionarem projecções, quer para o interior, quer para o exterior destes.

Em sistemas gravíticos sem aplicação de pressões, a forma de junta mais utilizada é a do tipo *butt-faced* com um colar (ou manga, também conhecido por este termo) exterior, colocado à face da superfície exterior do tubo de forma a criar uma superfície nivelada. Pela utilização do colar ou manga este tipo de junta é também conhecido por *collared joint* ou *sleeve joint*. Podem no entanto ser utilizadas outros tipos de juntas em tubos de betão, como as do tipo *socket-and-spigot*, sendo necessário em cada tipo de juntas, um *packer* entre os tubos por forma a distribuir a carga de empurre uniformemente entre as faces dos tubos evitando pontos de carga isolados, não danificando as extremidades dos tubos. Normalmente estes *packers* são fabricados de fibra de madeira de média densidade (MDF - *medium-density fiberboard*) que, de acordo com a PJA depois de muitos estudos em busca de um material para este efeito, este foi o que se revelou o mais flexível dos materiais à base de madeira, com excelentes propriedades de recuperação. Os *packers* não devem possuir dimensões

exageradas e não devem ser colocados ocupando toda a profundidade da junta, mas sim deixando um espaço até à superfície interior do tubo, por forma a prevenir fragmentação localizada.

Para tubos sujeitos a pressão, o mais corrente é o uso de tubos de aço protegidos por outros materiais, cujas juntas são conseguidas através da soldadura *in situ* dos tubos.

Como já foi referido, os tubos fabricados em betão armado são os mais utilizados no emprego da técnica de *pipe jacking*, podendo as suas juntas serem dos dois tipos referidos em cima, rebatidas ou com utilização de colar (*collared* ou *sleeved joint*).

As juntas rebatidas formam um tipo *socket-and-spigot* no interior da parede dos tubos, colocando-se o anel vedante no centro da parede. Os anéis vedantes podem ser confinados ou móveis, como se pode observar na Fig. 3.10.

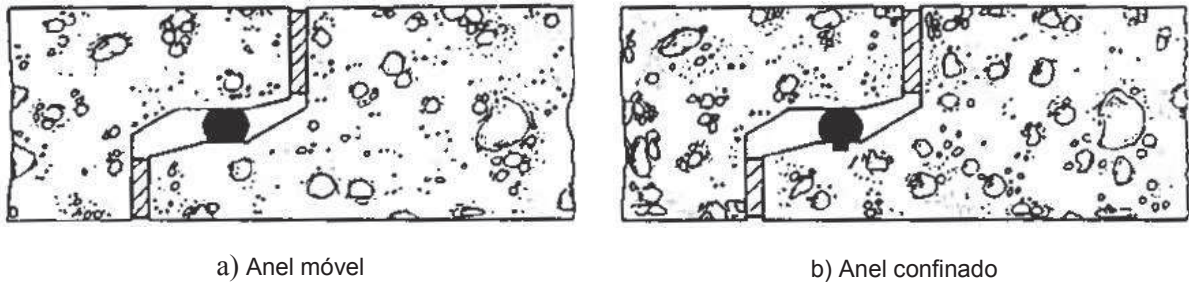


Fig. 3.10 – Juntas rebatidas para tubos de betão (Thomson 1993)

As juntas com introdução de colares utilizam o corpo principal do tubo como “rolha” utilizando como manga outro material. Os anéis vedantes colocam-se numa reentrância no exterior do tubo. Nas juntas com colar fixo (Fig. 3.11) os vedantes podem ser do tipo confinado ou móvel, tal como nas juntas rebatidas. Nas juntas em que são utilizados colares soltos (Fig. 3.12), são utilizados vedantes confinados em cada tubo interveniente na junta.

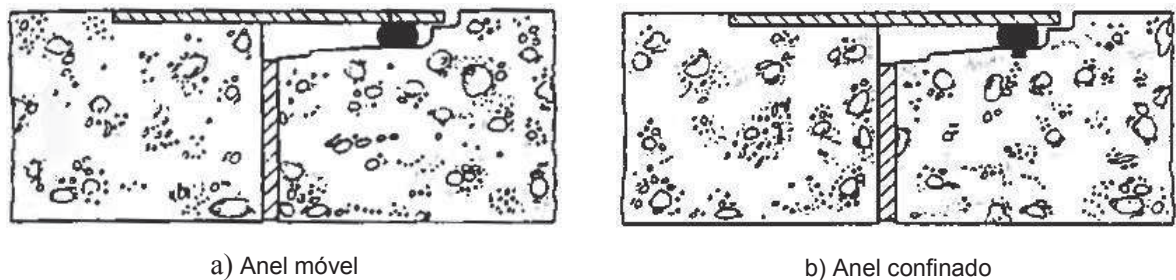


Fig. 3.11 - Juntas com colares fixos para tubos de betão (Thomson 1993)

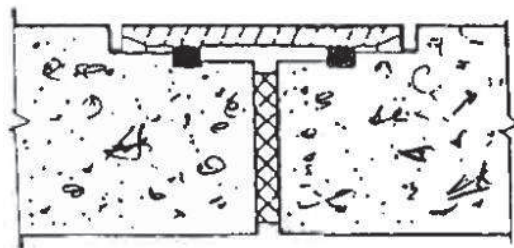


Fig. 3.12 – Junta com colar solto para tubos de betão (Thomson 1993)

Em ambos os tipos de juntas são utilizados os *packers* de MDF por forma a garantirem a correcta transmissão de carga de empurre.

As juntas do tipo rebatido limitam o carregamento axial que pode ser aplicado nos tubos, uma vez que apenas, aproximadamente metade da espessura da parede, pode ser considerada efectiva para a transferência de carga. Podem ser verificadas falhas sobre as juntas por carregamento assimétrico, devido a este tipo de junta. Perante estas limitações, as juntas com a utilização de colar são o tipo mais utilizado em todo o mundo. Na Europa as juntas com colar solto são utilizadas em tubos com diâmetros para micro túneis, enquanto que as de colar fixo são mais utilizadas à escala do *pipe jacking*. No Japão é utilizada uma variante das juntas de colar solto, em que este colar tem uma secção em T, funcionando como manga e ao mesmo tempo como superfície de transferência de carga (Fig. 3.13).

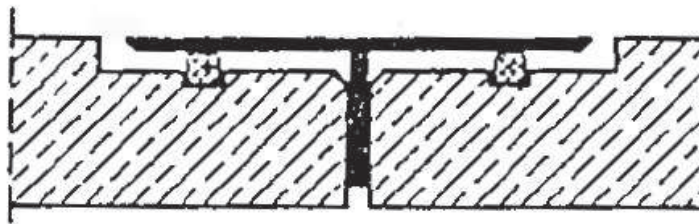


Fig. 3.13 – Junta com colar em T para tubos de betão (Thomson 1993)

Visto as mangas necessitarem de ser protegidas contra a corrosão, os calares utilizados nas juntas podem ser fabricados com os mais diversos materiais, tais como aço soldável, aço inoxidável ou fibra de vidro (GRP), no entanto nem todos os materiais estão disponíveis em toda a gama de tamanhos necessários. A espessura dos colares de aço varia com o diâmetro, embora exista alguma preocupação com a durabilidade do aço enterrado no solo. Como consequência deste aspecto, são aplicados alguns revestimentos ao aço, chegando algumas autoridades a alertar para o uso de um vedante secundário. Em locais onde os solos se prevêem com um potencial mais corrosivo é aconselhável a utilização de um colar mais resistente à corrosão.

No que diz respeito aos tubos fabricados em fibra de vidro (GRP), um dos mais conhecidos fabricantes, a empresa Hobas, produz tubos para empurre com juntas específicas da marca. As juntas são concebidas com colares do mesmo material, GRP, colados na extremidade rebatida do tubo que vai receber o próximo tubo a ser empurrado, incorporando um anel vedante de modo a assegurar a estanqueidade. Na extremidade rebatida do tubo a ser empurrado que vai funcionar como rolha contra o tubo previamente instalado é colocado também um anel vedante, ou seja, em resumo a junta é formada por um colar de fibra de vidro e dois anéis vedantes colocados nas extremidades dos tubos, sendo utilizado também um *packer* como forma de distribuição uniforme da carga axial. As figuras Fig. 3.14 e Fig. 3.15, representam esquemas de uma junta tipo para tubos de GRP da marca Hobas.

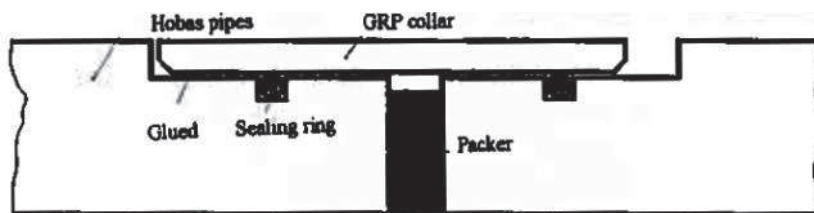


Fig. 3.14 – Esquema de junta para tubos Hobas de GRP (Thomson 1993)



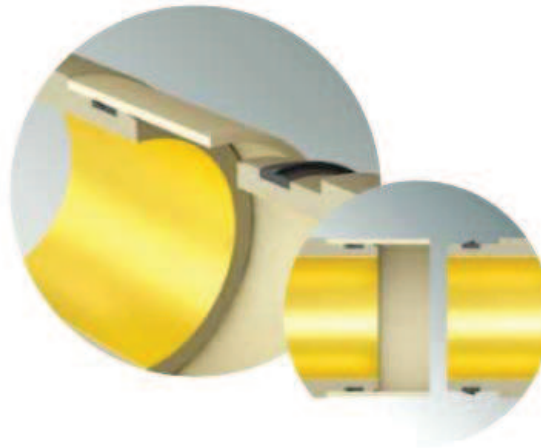


Fig. 3.15 – Esquema em 3D de uma junta para tubos Hobas de GRP (HOBAS 2010)

Em relação aos tubos cerâmicos para *pipe jacking*, os tipos de juntas variam conforme os diâmetros utilizados, podendo ser de três tipos, de acordo com as especificações alemãs. Para DN 150 mm, as juntas são formadas por um colar de polipropileno com vedantes fixos de elastómero. Em tubos com diâmetros nominais entre os 200 mm e os 500 mm, as juntas resultam da incorporação de um colar de aço perfilado com vedantes fixos de elastómero. Para os diâmetros maiores de DN 500 mm a DN 1000 mm, as juntas são conseguidas através da colocação de um colar de aço inoxidável, igualmente com vedantes fixo de elastómero. (Fig. 3.16)

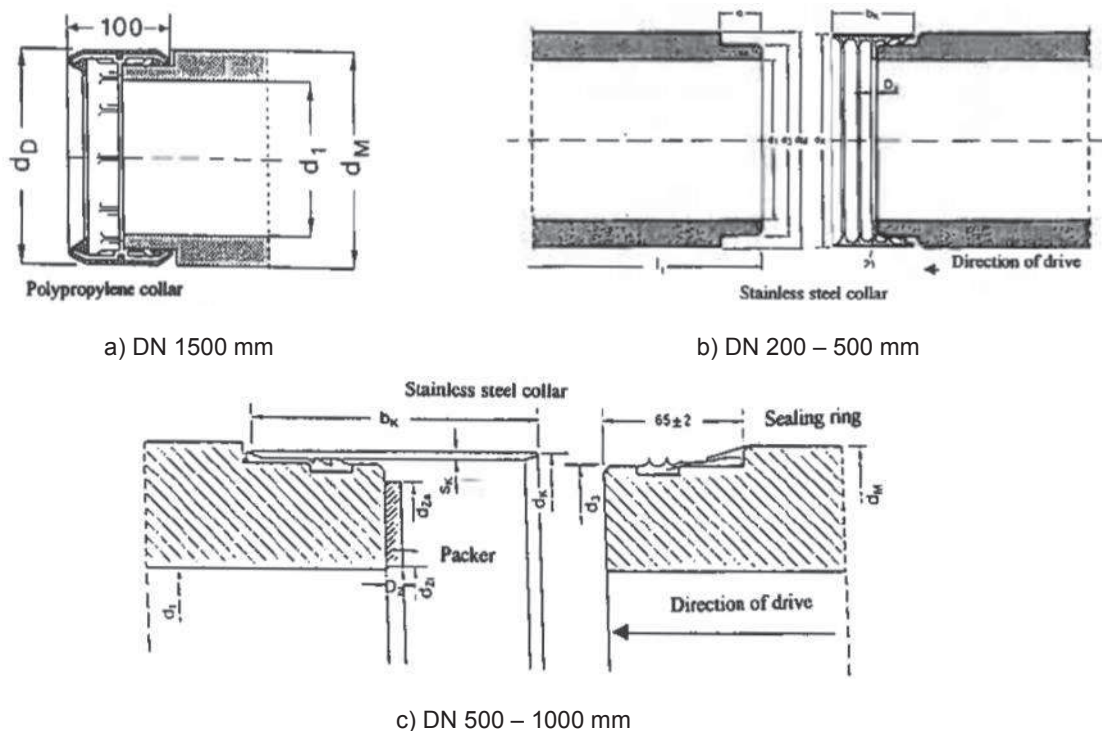


Fig. 3.16 – Tipos de juntas para tubos cerâmicos em função dos diâmetros nominais (Thomson 1993)

Nos tubos de PVC as juntas entre os diversos segmentos é normalmente conseguida através de um mecanismo de encaixe originado com o próprio molde dos tubos, garantindo as condições de ligação e estanqueidade requeridas. Os encaixes, usualmente, são específicos de cada marca que fabrica os tubos. Cada marca possui um ou vários tipos de encaixe, de acordo com as dimensões dos tubos ou com as propriedades necessárias às juntas. Na Fig. 3.17, em baixo, pode-se observar o pormenor de uma junta de um tupo de PVC do tipo de fecho forçado longitudinalmente, da marca alemã “egeplast” com o sistema de módulo SLR.

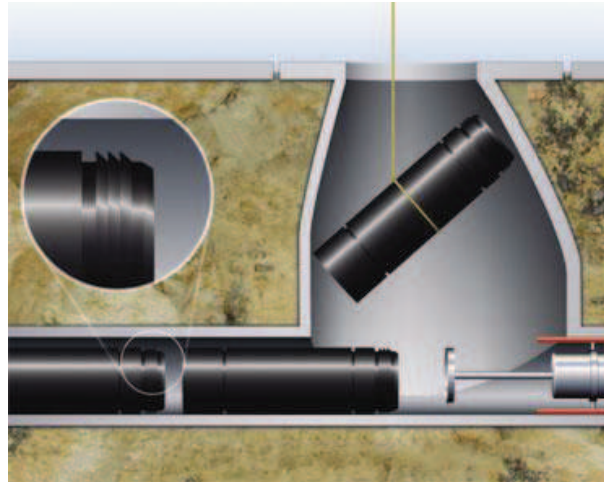


Fig. 3.17 – Pormenor de uma junta de tubos de PVC com módulo SLR (egeplast 2011)

Tal como acontece nos tubos de PVC, as juntas dos tubos de ferro fundido dúctil são específicas de cada marca, possuindo cada uma os seus mecanismos de fixação e vedação. Nas Fig. 3.18 e Fig. 3.19, podem ser observados dois tipos de juntas de tubos de ferro fundido dúctil da empresa “Kubota”, sendo cada um aplicado a uma gama específica de diâmetros. O primeiro tipo de junta, representado na Fig. 3.18, é do tipo *push-on* (tipo TD), em que a ligação é conseguida através de um mecanismo de empurre de um tubo contra o outro, tal como o próprio nome sugere e é aplicada na gama de diâmetros entre DN 300 mm e DN 1600 mm. No segundo tipo, da Fig. 3.19, a ligação é conseguida através de um sistema de fixação mecânico (tipo UD) com recurso a parafusos no interior da junta, sendo este tipo de junta aplicado em tubos de DN 700 mm a DN 2600 mm.

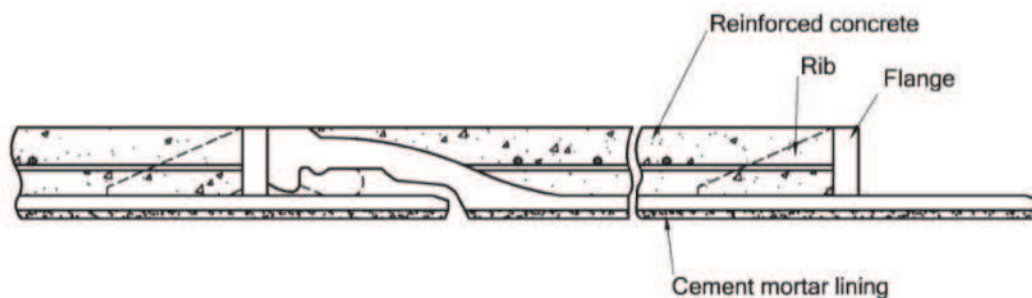


Fig. 3.18 – Esquema de junta tipo TD para tubos de ferro fundido dúctil – DN 300-1600 mm (KUBOTA 2007)

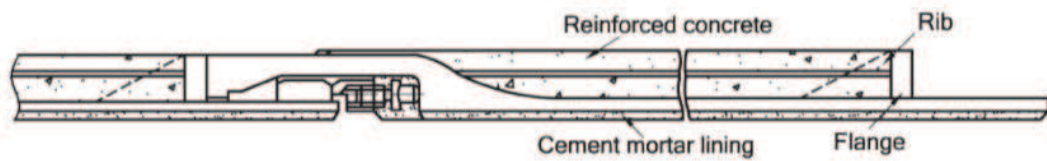


Fig. 3.19 - Esquema de junta tipo UD para tubos de ferro fundido dúctil – DN 700-2600 mm (KUBOTA 2007)

Em tubos soldados, como já foi referido, as juntas são conseguidas através da soldadura *in situ* dos próprios segmentos de tubos. Um inconveniente da aplicação de tubos de aço em sistemas de empurre, reside no facto de se tratar de um processo moroso, uma vez que as juntas são soldadas no local da instalação, repetindo-se o processo de soldadura a cada segmento de tubo a instalar. Por forma a tentar minimizar este tempo é preferível a instalação de segmentos com comprimentos maiores do que os segmentos comerciais dos tubos fabricados com outros materiais, normalmente segmentos até 6 metros, existindo o inconveniente consequente, de serem necessários poços de instalação de maiores dimensões para a introdução destes tubos no ciclo de montagem.

### 3.2.2.3 Extensão dos trechos entre poços

A extensão de cada trecho de túnel a executar correctamente com a técnica de empurre de tubos está dependente de múltiplos e variados factores que estão interrelacionados. Este comprimento depende da capacidade de empurre dos macacos e da carga que pode ser aplicada em segurança aos tubos, sendo estas forças determinadas em função das características geológicas de estabilidade e fricção do terreno que vai ser atravessado pelo túnel, da rigidez e peso próprio dos tubos a instalar, do diâmetro dos mesmo tubos, do método de escavação a utilizar e da capacidade e condições de reacção do maciço onde os macacos vão ganhar impulso. Estes aspectos são os que mais condicionam estas forças, ou seja, a natureza do terreno atravessado e as características do nível freático do mesmo. (PJA 1995)

Existem, no entanto, duas formas de maximizar a extensão dos trechos a instalar. Uma consiste na injeção de uma substância lubrificante entre o tubo a instalar e o solo, no espaço criado pela sobre escavação provocado pela tuneladora, por forma a reduzir significativamente a fricção entre o tubo e o solo. Na Fig. 3.20, pode observar-se o esquema de um sistema de lubrificação típico a tubos empurrados.

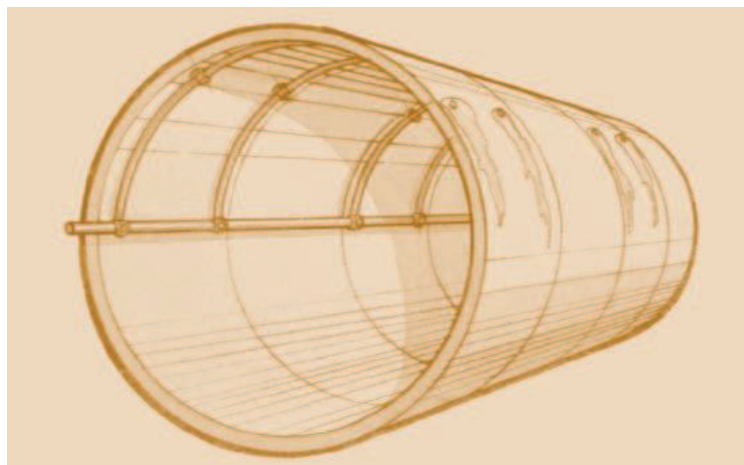


Fig. 3.20 – Sistema de lubrificação tipo, aplicado a um tubo de *pipe jacking* (PJA 1995)

A outra, consiste na incorporação de estações de empurre intermédias (*Intermediate Jacking Stations – IJSs*) no curso do túnel, em certos pontos, entre os tubos a empurrar. A IJS é formada por um conjunto de tubos deslizantes justapostos, com o mesmo diâmetro externo dos tubos constituintes do túnel, com macacos hidráulicos no seu interior, Fig. 3.21. Com os macacos a actuar, a estação ganha reacção nos tubos instalados atrás desta, por forma a empurrar o conjunto tubos-tuneladora que se encontra à sua frente. Os macacos da IJS voltam à sua posição inicial e a estação é fechada, pelo empurre do conjunto de tubos anteriores por intermédio dos macacos situados no poço de ataque, preenchendo o espaço gerado pelo empurre do conjunto tubos-tuneladora no sentido do avanço. Com a instalação de IJSs a força necessária para instalar o conjunto, na extensão total do trecho a construir, é dividida por um número de pontos de empurre, o que reduz para valores aceitáveis os níveis de carga máxima, em cada ponto da construção. Um esquema de uma IJS em operação está ilustrado em três passos, nos cortes presentes na Fig. 3.22.

Com a inclusão destes métodos na construção, já foi possível a instalação de tubos num só vão, com comprimentos superiores a um quilómetro. Em algumas situações, em instalações com um só vão, foram utilizados mais do que 20 IJSs. O comprimento do trecho a instalar com a incorporação de IJSs pode ser teoricamente infinito, mas na prática, tendo em conta a equação global das forças, este método é tido em consideração como um factor que promove o aumento do alcance da instalação.

A incorporação de IJSs no curso dos túneis é mais utilizada na construção com tubos à escala humana, nos quais é permitido o acesso de pessoas, uma vez que é necessária a remoção dos macacos hidráulicos do interior das estações e a posterior colmatação do espaço que estes ocupavam.



Fig. 3.21 – Estação de empurre intermédia (IJS) (Akkerman 2011)

A operação de um número de estações em conjunto, pode ser programada de modo a realizar-se numa série de passos sequenciais automáticos, sem a perturbação das operações normais de instalação. À medida que a extensão de túnel instalada aumenta, não sendo possível as IJSs serem alimentadas pela unidade de alimentação principal que se situa à superfície, é necessário instalar unidades de alimentação hidráulica mais pequenas no curso do túnel por forma a fornecer as estações intermédias. Estas estações são controladas, remotamente, a partir do painel de controlo central.

Uma boa prática de execução, traduz-se na instalação de uma estação de empurre intermédia a uma distância relativamente curta da face de escavação, por forma a superar forças excessivas inesperadas, que possam aparecer ao nível do escudo.



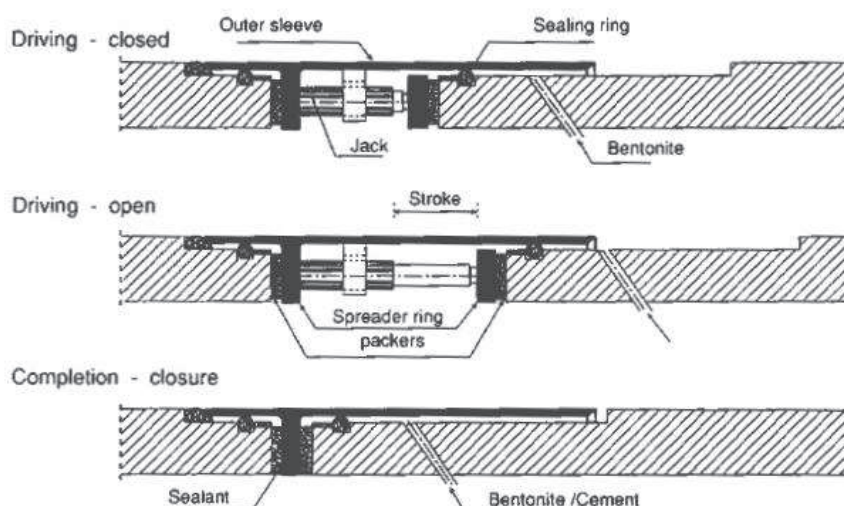


Fig. 3.22 – Esquema de operação de uma IJS (Thomson 1993)

O posicionamento das IJSs a incorporar no curso do túnel, bem como o números de estações a instalar, deve ser planeado antes do início dos trabalhos de empurre. O custo de instalação de uma estação adicional no início das operações é relativamente baixo, mesmo que não seja necessária, pois as forças de empurre permanecem baixas. No entanto, se não são instaladas as estações suficientes, as forças aumentam subitamente, sendo de extrema complexidade adaptar uma nova estação intermédia no meio do curso, aumentando consecutivamente os custos. (Thomson 1993)

Na Fig. 3.23, encontra-se representada uma tabela que a PJA apresenta, com comprimentos indicativos de trechos a executar entre poços e o número máximo de trechos para certos comprimentos, em função dos diâmetros a implantar e dos respectivos métodos de escavação utilizados na sua construção.

EXCAVATION TECHNIQUE	<0.9M	0.9M	1.0M	1.2M	1.35M	1.5M	1.8M	>1.8M
Pipe jack – machine; remote operation from surface	Drive length limited only by capacity of jacking system			250m		400m	>500m	
	Man entry not acceptable		Avoid man entry					
Pipe jack – machine; operator controlled below ground	Not Acceptable			125m	200m	300m	500m	>500m
Pipe jack – hand dig	Not Acceptable			25m	50m	75m	100m	
				2 drive lengths			1 drive length	
							Use minidigger if > 2.1m	

Fig. 3.23 – Comprimentos indicativos de trechos entre poços em função do diâmetro da conduta e da técnica de escavação utilizada (PJA 1995)

#### 3.2.2.4 Transporte do solo escavado e ligações ao escudo

A velocidade e economia de uma operação de *pipe jacking* é, na maioria das vezes, controlada pela quantidade de despojos que podem ser transportados num período de tempo, desde a frente de escavação pelo curso do túnel já construído, até ao poço de ataque. Dependendo do tamanho e da natureza da operação, podem ser utilizados variados métodos para o transporte do solo escavado.

O curso do túnel é também um meio por onde passam as ligações de energia e comunicação que vão ser fornecidas ao escudo da frente de escavação para este ser operado, monitorizado e ajustado, durante a execução dos trabalhos.

O solo escavado na frente do túnel tem que ser transportado ao longo do seu curso até ao poço de ataque e deste até à superfície, a partir da qual é removido transportado para fora do local da obra. A parte que normalmente é mais crítica no ciclo de operações é a remoção deste solo escavado e é a chave da taxa do avanço do *pipe jacking*. Uma limitação principal ao aumento da capacidade de remoção dos despojos é estar a operar num espaço com uma secção transversal reduzida, que pode não permitir a implementação de um sistema de transporte sobre rodas, com a excepção de túneis com diâmetros de maiores dimensões. Nestes casos são utilizados frequentemente, sistemas que operam por sucção do solo escavado, mesmo em situações que não exijam câmara de equilíbrio de pressões.

A escolha do sistema de transporte do solo escavado tem que ser compatível com a natureza e volume de escavação e com o comprimento do trecho a executar. Dependendo destes factores existem várias formas de realizar o transporte do material escavado, tais como: em “cestos” sobre rodas ou carris, em esteiras rolantes, com recurso a bombagem, em roscas transportadoras (“sem-fins”) ou com extracção em vácuo.

As primeiras três formas de transporte de solo escavado descritas em cima, são utilizadas em túneis visitáveis, enquanto os últimos dois são utilizados para diâmetros mais pequenos, os quais não permitem a presença humana.

Seja qual for o método de transporte utilizado, é necessário assegurar que este sistema esteja integrado com os restantes equipamentos e operações a decorrer no interior do túnel.

- Sistemas sobre rodas

Em extensões reduzidas em que seja possível a entrada humana, contentores com rodas de manuseamento manual podem ser utilizados, embora seja uma operação de intenso esforço e demasiado desgastante. Para longos trechos é ineficiente, e insegura para inclinações razoáveis.

Sistemas de transporte com recurso a contentores movidos por sistemas de guinchos que os movimentam para o interior e para o exterior do túnel são um progresso para o transporte manual, embora os cabos tencionados podem colocar em perigo os trabalhadores, quando os trabalhos se desenrolarem sem o cumprimento apertado das regras de segurança. As velocidades típicas de operação dos guinchos são da ordem dos 5 a 10 km/h, embora velocidades mais elevadas possam ser alcançadas. Os sistemas de transporte movidos por guinchos são eficientes para cursos de túneis até 250 metros de comprimento.

Com o aumento significativo do curso dos túneis, sistemas de transporte sobre carris e/ou alimentados a baterias (Fig. 3.24) podem ser rentáveis, a menos que não sendo projectados para a situação específica, podem promover um desperdício de espaço. Ao utilizar carris, os contentores que vão circular sobre eles, devem possuir as rodas montadas no seu interior, por forma a aproveitar melhor o espaço vertical do túnel. Este tipo de equipamento pode operar em diâmetros a partir dos 900 mm e

circular a velocidades da ordem dos 4 km/s. Um sistema rolante é normalmente montado na frente de escavação para encher os contentores com o material escavado.

De forma a poupar mais espaço no interior dos tubos, podem ser utilizados contentores com rodas orientadas em ângulos oblíquos ao sentido do rolamento, permitindo que estas rolem na superfície dos próprios tubos. Nestes casos as rodas têm que ser fabricadas com borracha para não danificar a superfície dos tubos. Esta disposição permite um maior uso do perfil dos tubos na maximização da remoção do solo escavado.

No poço de ataque, guindastes içam os contentores até à superfície, esvaziam-nos e voltam a colocá-los no ciclo de transporte para novo trajecto de transporte de despojos.



Fig. 3.24 – Contentor de transporte de solo movido a bateria sobre carris “Akkerman 1548 Haul Unit” (Akkerman 2011)

- Esteiras rolantes

Sistemas curtos de esteiras rolantes podem ser eficientes para carregar contentores ou para alimentarem colectores de despojos para outros meios de transporte, contudo, são difíceis de empregar para todo o curso do túnel, uma vez que a estrutura deste sistema, necessária para lhe fornecer estabilidade e direcção, irá ocupar uma grande parte da secção instalada. Alguma quantidade de solo transportado é inevitável de ser vertido para fora do seu percurso normal, o que vai diminuir a produtividade do trabalho e pôr em perigo a segurança no interior do túnel, principalmente em espaços mais confinados.

Se o túnel a executar possuir diâmetros relativamente grandes num vão relativamente curto, a grande capacidade de carga das esteiras rolantes é uma mais-valia económica e eficiente. No escudo, esteiras rolantes suspensas, de perfil estreito e extensível, são comuns para carregar contentores, uma vez que têm alcance para abastecer mais do que um contentor no mesmo ciclo, sendo a poupança de tempo deste sistema, mais significativa, para cursos com vãos mais extensos.

- Bombas volumétricas rotativas

As bombas volumétricas rotativas tiveram na sua origem, o objectivo de bombagem de betão, tendo sido utilizadas pela primeira vez como meio de transporte de solo removido numa instalação de *pipe*

*jacking*, no Japão na década de oitenta, para grandes diâmetros. A partir daí o seu tamanho tem vindo a ser reduzido, de forma que já é aplicável em diâmetros até aos 1400 mm.

O solo removido na face da escavação é alimentado numa calha de mistura e misturado até uma consistência aceitável. Por forma a aumentar a eficiência de bombagem é adicionada uma quantidade de água ou de lama bentonítica, sendo de seguida transportada por uma rosca rotativa até ao funil da bomba. Sendo o material forçado a percorrer a conduta de descarga, por uma bomba de pistão de actuação dupla, até pressões da ordem dos 120 bar.

É necessário que a mistura possua uma consistência semelhante à do betão fresco e deve conter no mínimo  $400 \text{ kg/m}^3$  de material com dimensões inferiores a 25 micrones. Em situações em que o solo escavado não seja um solo bem graduado e contenha pedaços de rochas é aconselhável que o material com dimensões inferiores a 25 micrones aumente para cerca de  $700 \text{ kg/m}^3$  da mistura. O diâmetro da conduta de descarga deve ser pelo menos três vezes superior à maior dimensão das partículas da mistura.

A título de exemplo, um bomba *Putzmeister TMP 16* (Fig. 3.25) actuando numa secção de 1500 mm de diâmetro, consegue bombear até  $16 \text{ m}^3/\text{h}$ , o que é equivalente a uma taxa de escavação de 105 mm por minuto, ou instalar um segmento de 3 metros de tubo de 1500 mm de diâmetro em 30 minutos.

Bombas volumétricas rotativas conseguem trabalhar continuamente por longos comprimentos e bombear o solo pelo poço de ataque directamente até aos receptores à superfície, com a vantagem de não necessitar de um processo elaborado de separação dos agregados antes do transporte.

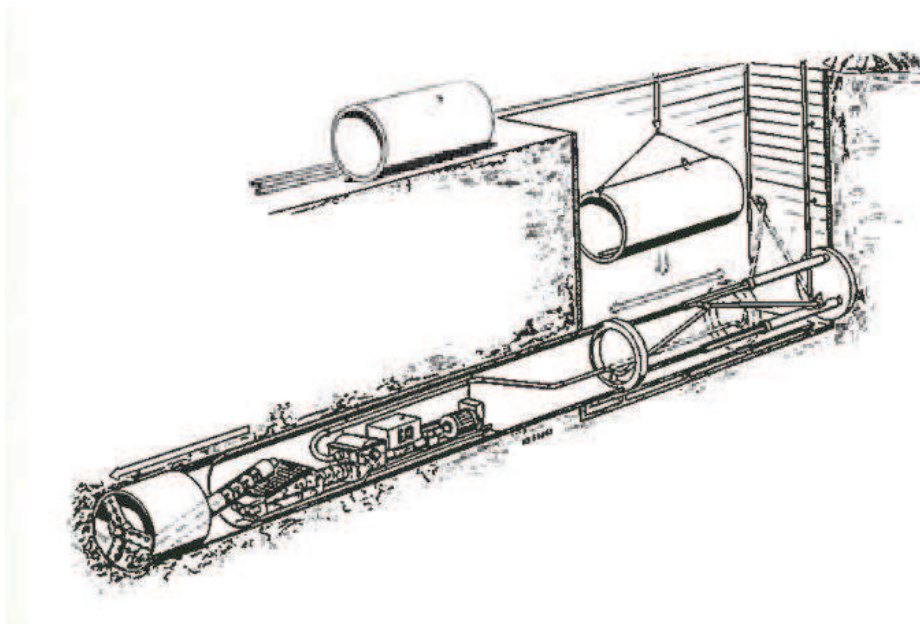


Fig. 3.25 – Bomba volumétrica rotativa tipo “Putzmeister TMP 16” (Thomson 1993)

- Bombas de lamas

Uma das razões para o sistema de transporte de solo escavado por bombagem de lamas ser preferencialmente escolhido para as aplicações em pipe jacking ou micro túneis, reside no facto de o circuito de lamas proporcionar um meio de estabilidade da frente de escavação. É um método que se torna económico em secções de túneis bastante ocupadas, uma vez que é capaz de realizar o transporte

de elevado volume de material ao longo de grandes distâncias de curso de túnel, através do poço de ataque e deposita-lo à superfície.

Tratando-se este sistema de um método de condução dupla de transporte, é normalmente feita a distinção entre a lama limpa (*mud*), com as condições de consistência projectada e a lama que já tem misturado o solo escavado (*slurry*). O sistema de bombagem consiste numa condução de carga que transporta a lama limpa até à câmara situada atrás da cabeça de corte e numa condução de descarga que leva a mistura de lama com o solo escavado até à superfície. Tanto, água como lama bentonítica, podem ser utilizadas como meio de transporte. A água possui as vantagens de ser barata, fácil de adquirir e fácil de separar do solo. Argilas e siltes funcionam bem com a água, embora seja necessária a lama bentonítica para areias e cascalho como forma de suporte da face de escavação.

A densidade da lama que pode ser bombeada está limitada a cerca de 1,4 toneladas por m<sup>3</sup>, sendo a carga máxima que pode ser transportada limitada a cerca de 400kg/m<sup>3</sup>. Estando o escudo equipado com um mecanismo de trituração, um sistema de bombagem de lamas pode operar com a maior parte dos tipos de solo.

A correcta combinação entre diâmetro da tubagem, concentração da lama e velocidade hidráulica, é indispensável para o projecto eficaz do sistema. A velocidade de operação precisa de ser maior do que a velocidade crítica. A velocidade crítica de lamas bentoníticas pesadas é inferior à velocidade crítica da água. Existem equipamentos para medição de caudal e densidade, embora muitos empreiteiros utilizem verificadores de viscosidade padrão combinados com a experiência do operador.

Ao nível do poço de ataque deve se realizada a preparação para acomodar a sequência de empurre, que envolve a adição sucessiva de segmentos de tubos e empurra-los pelo poço. Válvulas de retenção são utilizadas para manter o sistema sob pressão, enquanto juntas de acção rápida facilitam a abertura da condução e a adição de novos segmentos. As condutas de carga e descarga possuem ligações flexíveis ao nível do fundo do poço de ataque, por forma a permitir o movimento das condutas em consonância com a operação de empurre dos tubos do túnel.

- Roscas transportadoras

As roscas transportadoras, actuam dentro de um invólucro de aço e são um método favorável para o transporte de solo escavado em sistemas de micro túneis. O seu emprego em operações de *pipe jacking* tem sido limitado, uma vez que para movimentar grandes volumes dos mais variados tipo de solo ao longo de grandes distâncias, levanta muitos problemas em termos da quantidade de energia necessária para o movimento bem como levanta problemas com aberturas das juntas e bloqueios do sistema.

Um exemplo de rosca transportadora utilizada em *pipe jacking* é a *Westfalia WBM-L12* (Fig. 3.26), neste caso projectada para tubos com DN 1200 mm, com rosca de 120 mm a funcionar dentro de um invólucro suficientemente pequeno para permitir a entrada humana no escudo. A cabeça de corte é movimentada por um sistema independente da rosca transportadora, rosca esta que irá movimentar o solo até ao fundo do poço de ataque onde será directamente descarregada num contentor, o qual será elevado até à superfície.

Quando é utilizado este tipo de transporte de solo, é importante regular o volume de solo que entra para o trado de forma a prevenir o sobre enchimento de modo a não causar um aumento de carga friccional nem o risco de colmatação. Uma forma de conseguir regular esse volume é instalar um passo apertado no início do trado.



Uma utilização muito específica para o sistema de rosca transportadora é a sua aplicação em escudos de equilíbrio de pressões de terra, onde transportam o solo escavado em curtas distâncias desde a câmara de pressão até ao sistema de transporte de solo instalado no curso do túnel. De modo a manter a pressão na câmara e não perturbar o equilíbrio de terras, a velocidade da rosca transportadora é cuidadosamente controlada para equilibrar o solo removido com o avanço da frente, estando também equipada com uma válvula de corte na sua secção final de forma poder interromper o fluxo de água.

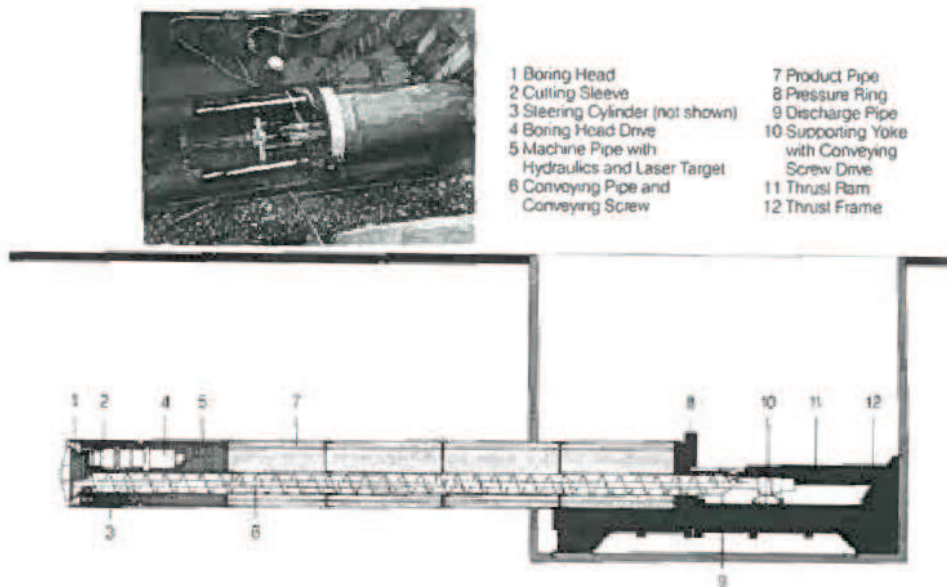


Fig. 3.26 - Rosca transportadora do tipo "Wesfalia WBM-L12" (Thomson 1993)

- Extracção em vácuo

Transportadores pneumáticos, tanto do tipo de pressão como de sucção, são empregues num variado número de indústrias, e alguns fabricantes de micro túneis adoptaram sistemas de sucção por vácuo.

A quantidade de energia necessária para transportar o volume de solo escavado de solo numa operação de *pipe jacking* torna a extracção em vácuo impraticável e pouco económica para a maioria das situações. Contudo, um sistema alemão de remoção de solo em vácuo utiliza tubos com secções de 50 mm a 250 mm e uma bomba especial que fornece até 80% de vácuo. O material é carregado num funil na frente de escavação, sugado ao longo do curso do túnel e depositado num tanque fechado à superfície. Foram conseguidas distâncias de extracção superiores a 200 m, com o rendimento de 100 toneladas de material por hora e com a necessidade de um fornecimento de ar de 11500 m<sup>3</sup>/h. No entanto, o material que pode extrair é limitado, uma vez que material com propriedades coesivas pode entupir o sistema, bem como o excesso de água pode ser outro problema.

### 3.2.3 Poço de ataque

Um poço de ataque numa operação de *pipe jacking* consiste no elemento onde se iniciam os trabalhos de execução do túnel propriamente dito e pelo qual passarão todas as operações que impliquem movimentações de material e/ou pessoas para o interior e para o exterior do túnel.

O poço de ataque deve proporcionar as seguintes funções: acomodar o equipamento de empurre (macacos hidráulicos) que irão instalar os tubos; transferir o impulso de empurre uniformemente para o tubo a instalar; acomodar o elemento de reacção para o impulso; providenciar uma área para recepção, colocação e união dos tubos; servir de área para remoção do solo escavado ao longo do curso do túnel; ser uma base de observação e uma área segura de trabalho.

De uma modo geral estão retratadas as funções que o poço de ataque deve desempenhar, na Fig. 3.27.

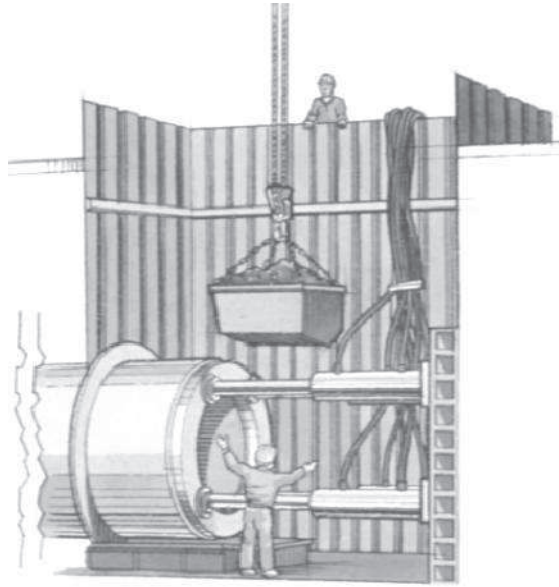


Fig. 3.27 – Esquema geral de um poço de ataque (PJA 1995)

### 3.2.3.1 Equipamento de empurre

Os elementos principais do equipamento de empurre são os macacos hidráulicos, a estrutura onde estes assentam e o anel de distribuição de impulso. Os macacos são quase sempre cilindros hidráulicos, situados numa estrutura que lhe serve de suporte e transmite as forças de empurre, tanto para a parede de reacção como para o anel de impulso.

Os equipamentos originais eram muitas vezes montados utilizando materiais e componentes disponíveis nos depósitos de material dos empreiteiros, o que os tornava rudes e ineficientes. Os equipamentos mais recentes são projectados de modo a serem integrados no conjunto de todas as outras operações decorrentes no processo de *pipe jacking* e de modo a ocupar o mínimo espaço possível com o objectivo de reduzir as dimensões do poço de ataque onde se encontram inseridos.

A velocidade de empurre deve acompanhar a velocidade de progressão e escavação do túnel. A disposição do equipamento deve ser tal que torne facilitado o manuseamento dos tubos e dos contentores de despojos no poço, bem como facilitar os processos de monitorização e controlo. Estes equipamentos devem igualmente ser fáceis de instalar e de se adaptar a uma vasta gama de trabalhos. Alguns modelos possuem a estação de fornecimento de energia eléctrica e hidráulica ligada aos vários componentes, incorporada no próprio equipamento, porém a disposição mais corrente é situar unidades de fornecimento de energia fora do poço de ataque, afastadas dos próprios equipamentos de empurre.

A capacidade do fornecimento de empurre está dependente da carga máxima que pode ser aplicada em segurança aos tubos a serem instalados, sendo esta por sua vez, dependente do diâmetro e da espessura das paredes dos mesmos tubos. Esta carga máxima pode variar desde menos de 50 toneladas no caso de um trabalho pequeno num micro túnel até alguns milhares de toneladas no caso de uma aplicação de um tubo de grande diâmetro. Uma generosa reserva é normalmente fornecida para acomodar altas cargas de arranque, de curta duração, que podem ocorrer após uma paragem do trabalho.

De modo a fornecer o impulso, dois ou mais macacos hidráulicos são normalmente montados na estrutura. Estes macacos podem ser de longo curso, quando o seu curso se assemelha ao comprimento da secção dos tubos a serem conduzidos pelo poço, ou de curso curto, que requerem a inserção de espaçadores de forma a proporcionarem o movimento de empurre dos tubos pelo poço. Alternativamente, após cada curso, os macacos podem ser movidos em direcção ao túnel ao longo da estrutura, fixados e repetido o ciclo de empurre.

Na instalação de secção de grandes dimensões pré-fabricadas, por exemplo tipo *coulverts*, podem ser utilizados para o empurre mais de 20 macacos hidráulicos, com uma capacidade total de alguns milhares de toneladas. Cilindros hidráulicos individuais, são operados normalmente em altas pressões entre os 300 e os 650 bar e podem ter uma capacidade de empurre de 30 a 300 toneladas. As unidades de alimentação que potenciam a energia hidráulica aos macacos são dimensionadas de acordo com o número e tamanho dos cilindros, bem como de acordo com a velocidade de empurre necessária.

Como os tubos são empurrados pelo poço, a carga de empurre tem que os seguir no seu curso, podendo isto ser conseguido de várias formas. Cilindros telescópicos (Fig. 3.28) de duas ou três secções estão disponíveis e proporcionam cursos de empurre até 4000 mm, o que é suficiente para a instalação da maior parte dos tipos de segmentos de tubos existentes no mercado. Estes cilindros são normalmente fixados na parte anterior do poço, possuem um comprimento básico substancial quando retraídos, o que faz com que necessitem de um aumento das dimensões do poço de modo a acomodá-los.



Fig. 3.28 – Equipamento de empurre com cilindros telescópicos hidráulicos, SEGOQUI HT-2000 (TalleresSegovia 2009)

Uma segunda abordagem é organizar a estrutura, transportando macacos de curso curto, com cerca de 300 mm, movimentando-os ao longo de uma subestrutura. A estrutura de empurre, que comporta os macacos, encontra-se localizada e fixa à subestrutura por um dispositivo adequado do tipo *pocket-and-pin*. Após o empurre completo de cada curso, a estrutura é despreendida, movida em direcção à entrada do túnel e fixada novamente, por forma a realizar um novo ciclo de empurre. (Fig. 3.29)





Fig. 3.29 – Equipamento de empurre com estrutura móvel sobre estrutura fixa (Akkerman 2011)

A terceira abordagem consiste em manter os cilindros fixos na mesma posição e utilizar espaçadores mecânicos após cada curso de empurre de modo a estender o impulso. Com a utilização de espaçadores múltiplos é requerida alguma forma de bloqueio entre os espaçadores para evitar o perigo de escorregamento entre eles. (Fig. 3.30)



Fig. 3.30 – Equipamento de empurre com macacos de curso curto e espaçadores metálicos (Iseki 2009)

Alguns equipamentos de empurre incorporam, na sua parte de trás uma placa de aço com o objectivo de assegurar uma distribuição equilibrada das forças de empurre do equipamento para a parede de reacção. Os anéis distribuição de impulso, como o nome indica, espalham uniformemente o impulso proveniente dos macacos para as secções dos tubos, têm que ser rígidos e encaixar perfeitamente no perfil dos tubos. Os *packers* colocados na face dos tubos ajudam igualmente a uma distribuição equilibrada das forças de empurre. Os anéis de impulso são moldados ou pré-fabricados em secção metálica de aço e são equipados com mecanismo *ball-and-socket* nas placas das extremidades para assegurar mais uma vez uma transmissão uniforme da carga de empurre no bordo do tubo.

### 3.2.3.2 Parede de reacção

Na traseira dos macacos é necessário fornecer a reacção necessária ao empurre, através de um elemento capaz de suportar a carga prevista sem sofrer deslocamentos. A forma mais usual deste elemento é uma parede construída ou colocada na parte de trás do poço de ataque, a qual distribuirá as cargas em segurança, dos macacos para as terras atrás do poço. Sendo a operação realizada à superfície ou se as condições do solo são de tal modo fracas que não são capazes de suportar a carga, é necessário proporcionar uma alternativa para a reacção, seja por intermédio de blocos, estacas ou outros métodos.

As paredes que transferem as cargas provenientes dos macacos para o solo podem ser construídas em betão armado, em placas de aço ou ainda em grelhas metálicas. A carga, em primeiro lugar, é transferida para a estrutura que se encontra na parte anterior do poço e desta para o solo. Seja qual for o tipo de estrutura, as dimensões e a rigidez da parede de reacção têm de ser projectadas de forma a que a carga seja transmitida uniformemente para o solo e se encontre dentro dos valores admissíveis quer em termos de esforços, quer de deslocamentos.

Para o cálculo do impulso passivo desenvolvido pela parede de reacção é utilizada a equação de Rankine-Bell. O que para uma parede de altura  $H$  e um solo de peso volúmico seco  $\gamma$ , o impulso é calculado pela equação (3.1) abaixo representada.

$$T_p = 0.5 K_p \gamma H^2 + 2 c' \overline{K_{pc}} \quad (3.1)$$

Em que  $T_p$  é o impulso passivo por metro de desenvolvimento da parede,  $K_p$  é coeficiente de pressões passivas da terra em relação ao ângulo de atrito interno,  $K_{pc}$  é o coeficiente de pressões passivas em relação à coesão efectiva do solo e  $c'$  é a coesão efectiva do solo.

No cálculo do impulso passivo, duas condições vitais são muitas vezes ignoradas. Primeiro, para a equação de Rankine-Bell ser válida, a parede tem que rodar para dentro em direcção ao solo, como se pode observar na Fig. 3.31.

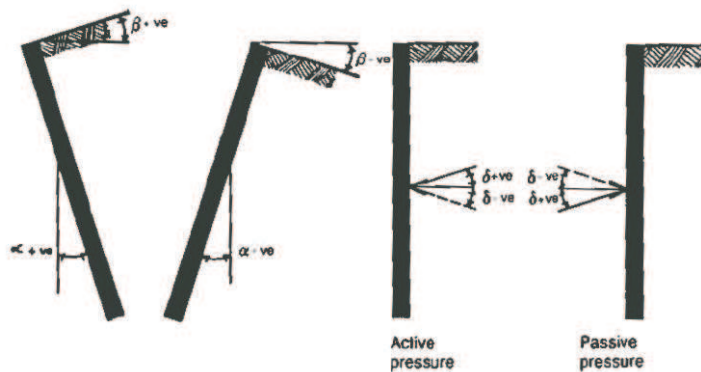


Fig. 3.31 – Modo de rotação da parede de reacção (Thomson 1993)

Em segundo lugar, para mobilizar o máximo impulso passivo, deve haver movimento na base da parede, o que pode ser expresso como uma fracção da altura da parede e varia de acordo com o tipo de solo existente atrás da parede. A seguir encontram-se os movimentos requeridos para vários tipos de solo.

- Argila mole H/20
- Argila dura H/50
- Argila muito dura H/70
- Areia solta H/20
- Areia compacta H/100

Como se pode reparar, estes movimentos são bastante significativos, por exemplo, para uma parede de 5 metros de altura a gama de deslocamentos da base situa-se entre os 50 mm e os 250 mm. Se a parede ou o sistema não puderem acomodar este movimento, o impulso passivo não é completamente mobilizado. A relação entre o movimento sofrido pela base da parede e o impulso passivo mobilizado, não resulta numa relação linear, como se pode observar na Fig. 3.32, o que significa que é necessário um movimento substancial para mobilizar uma pequena parte do impulso passivo.

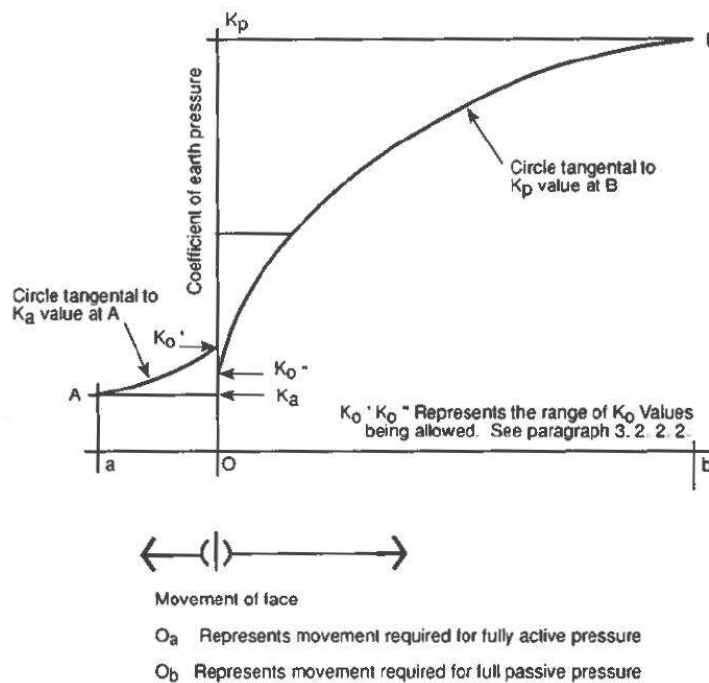


Fig. 3.32 – Relação entre o movimento da parede e o impulso mobilizado (Thomson 1993)

É de notar que esta análise assume que a toda a altura do poço actua como parede de reacção, que esta parede não possui atrito no contacto com o solo e é livre de se mover o suficiente para mobilizar todo o impulso passivo. Na realidade a parede de reacção é um bloco ou um sistema de em grelha metálica que actua na parede do poço, sendo esta parede projectada para suportar o solo adjacente e realizada independentemente do projecto da parede de reacção. Actuando exclusivamente como uma estrutura de suporte de terras, esta parede de retenção tem um sistema complexo de pressões de terras actuantes. Podem existir impulsos activos atrás da parede e impulsos passivos na parte da frente da base da parede, abaixo do nível da soleira do poço. Para poços que possuam sistemas de suporte multi-apoiados, surge um padrão de distribuição de pressões de terras ainda mais complexo.

A menos que a parede do poço seja projectada para permitir suportar as forças de reacção provenientes do empurre dos tubos, a estabilidade do conjunto, parede de reacção e parede de retenção de terras do

poço, pode estar em risco. As forças de empurre, no esforço de gerar um elevado impulso passivo no solo, irão deformar a parede do poço, deformação esta que conduz à formação de elevadas forças de atrito atrás da parede e uma mudança radical na distribuição simples de pressões de terras, provavelmente assumida no projecto. Em sistemas multi-apoiados isto pode resultar numa mudança dramática de cargas na escoras, podendo-se esperar a perda de rigidez de escoras do sistema.

### 3.2.3.3 Instalação dos tubos, posicionamento e monitorização

Segmentos sucessivos de tubos têm de ser baixados para dentro do poço de ataque, colocados na correcta posição e unidos ao segmento já instalado. Aquando da utilização de métodos controlados remotamente, o sistema de recolha de solo escavado a par com as linhas de comunicações e fornecimento de energia, têm que ser deligadas cada vez que um novo segmento de tubo alcança o fundo do poço, sendo posteriormente religados quando o segmento já estiver devidamente colocado no suporte e pronto a ser empurrado.

Em solos não coesivos ou em operações abaixo do nível freático, é necessário a instalação de um “olho de vedação” em volta do orifício por onde são instalados os segmentos dos tubos, de forma a impedir que o solo e a água penetrem para o interior do poço enquanto os tubos são instalados

O poço proporciona a base para observação e monitorização do alinhamento e nivelamento do túnel. Um método simples consiste em montar um instrumento topográfico, como um teodolito ou uma estação total, numa estação base conhecida observando um alvo na face da escavação. O mais usual é instalar um laser fixo no poço, numa base conhecida por forma a fornecer um feixe constante de luz, focado num alvo ao nível da face da escavação.

- Posicionamento

Uma grande quantidade de instalação directa de tubos por empurre, requer que os tubos sejam instalados com tolerâncias apertadas de nivelamento e alinhamento ( $\pm 25\text{mm}$ ). Uma cuidadosa monitorização e um ajuste apertado do sistema de orientação são necessários para alcançar esta precisão. A extensão e a frequência de informação necessária a ser gerada dependerá tanto da natureza do trabalho como do equipamento envolvido.

A informação topográfica fundamental que tem que ser obtida consiste nas coordenadas posicionais X, Y e Z. Em que X é a designação para as coordenadas horizontais, Y é a designação para as coordenadas verticais e Z é a designação para as coordenadas ao longo do eixo longitudinal.

Essas coordenadas são obtidas a partir de uma estrutura de referência conveniente, sendo, normalmente, mas não imperativamente, o designado eixo central. Adicionalmente às coordenadas posicionais, os ângulos de rotação da cabeça são essenciais em algumas operações e úteis noutras. O ângulo de rotação em torno do eixo principal é designado de *Roll*, a rotação no eixo horizontal designa-se *Lead* e a rotação no plano vertical é o *Look-up*.

O *Roll* tem uma especial importância quando as coordenadas X e Y não são medidas nos eixos principais. *Lead* fornece a medida de quão longe um lado do escudo conduz o outro. *Look-up* dá a medida pela qual a base conduz ou fica aquém da coroa. *Lead* e *Look-up* não são vitais na localização da posição actual mas são de grande valor na previsão da trajectória provável.

A estrutura básica para qualquer monitorização é o levantamento global da zona. Os pontos de referência estabelecidos e toda a monitorização devem relacionar-se com a base do levantamento.



- Posicionamento e monitorização de uma operação com acesso humano

Os sistemas topográficos utilizados em túneis de *pipe jacking* que permitem o acesso humano, são similares aos métodos utilizados na construção tradicional de túneis. O posicionamento do escudo de avanço em relação ao alinhamento e nivelamento requeridos têm de ser monitorizado continuamente ou em intervalos frequentes.

Um topógrafo com um teodolito é o método clássico para a obtenção das coordenadas X e Y, sendo a coordenada Z obtida por medição directa ou através do cálculo pelo número de tubos já instalados. O *Roll* pode ser medido directamente num escudo aberto com o recurso a um prumo, bem como o *Lead* e o *Look-up*. A mesma informação pode ser obtida por leituras do alinhamento e nível da frente e traseira do escudo. Este método requer um topógrafo experiente, visto tratar-se de operações intermitentes e frequentemente interrompidas.

Uma monitorização por laser é preferível em *pipe jacking*, uma vez que ultrapassa alguns inconvenientes do método de monitorização por teodolito. O laser é montado numa base ou num suporte cuja posição é fixa e levantada previamente, fornecendo este laser um feixe de luz contínuo e um ponto brilhante num alvo situado no escudo. Este alvo é colocado por forma a evitar o olhar directo dos trabalhadores para o feixe e por forma a manter o feixe claramente desobstruído. Uma referência constante em cada momento é visível para obter medições e para os operadores do equipamento de empurre. (Fig. 3.33)

Contudo, os lasers têm algumas limitações em *pipe jacking*. Em primeiro lugar, o laser tem que ser montado na parte anterior do poço de ataque, o que faz com que deslocamentos passivos possam ocorrer no solo adjacente quando a parede de reacção estiver em carga, devido às cargas de empurre. A posição fixa pode sofrer deslocamentos, fornecendo dados pouco precisos. Lasers com auto-regulação podem compensar a inclinação do chão, mas a distorção rotacional e horizontal tem que ser monitorizada por um teodolito acima do nível do chão do poço ou por um prisma de desvio de laser. Com a colocação de um alvo secundário mais elevado na frente de escavação, um feixe secundário gerado pelo prisma pode ser monitorizado para desvios.

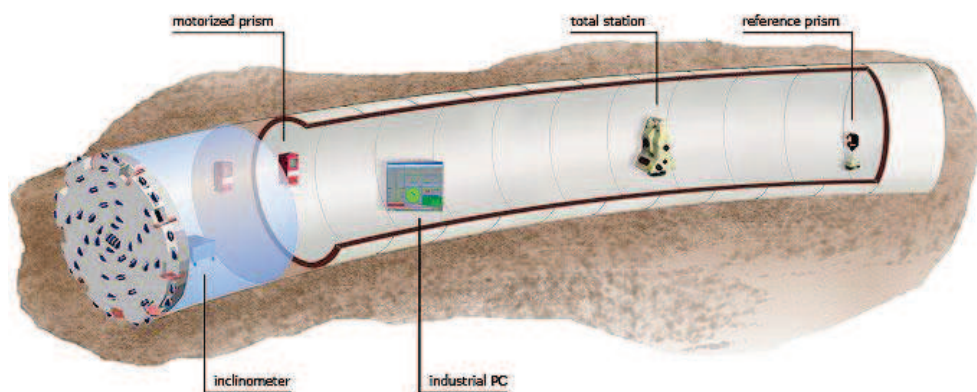


Fig. 3.33 – Esquema de um curso de um túnel visitável, monitorizado com estação total e prismas de desvio de laser (PPS 2011)

Um segundo problema consiste no desvio dos feixes do laser, que podem ser causados por diferenças de temperatura ao longo do curso do túnel, podendo essas diferenças serem causadas pela maquinaria, sistemas de ventilação ou ainda pela incidência directa do sol no poço de ataque.

Um terceiro problema é o facto de, à distância e numa atmosfera poeirenta e obscura, o feixe se apresentar disperso, o que aumenta a dificuldade de obter leituras precisas de coordenadas. Pode ajudar o facto de existirem pontos de referência duplos pelas quais os lasers possam passar. Para cursos longos é possível montar pontos de referência intermédios e pela computação de leituras para a frente e para trás desses pontos, pode-se obter uma normal informação topográfica.

Para o levantamento de túneis empurrados em cursos com curvas, é seguido um processo similar pela localização de séries de pares de transmissores visados directamente no curso do túnel. O *software* pode interpretar e analisar os dados e ao mesmo tempo fornecer leituras aos terminais e um permanente registo. (Fig. 3.34)

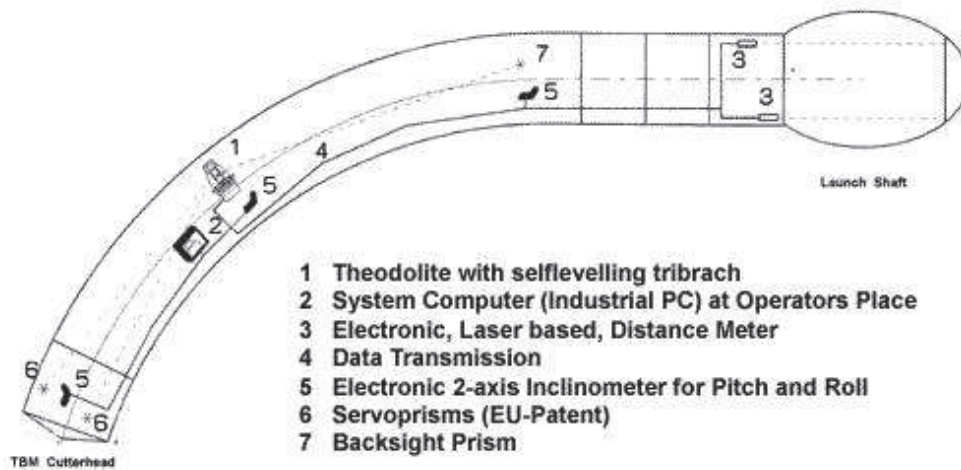


Fig. 3.34 – Diagrama funcional de um sistema de orientação de um túnel em curva construído com *pipe jacking* (PPS 2011)

O teodolito com laser combina os dois sistemas num só instrumento, superando algumas desvantagens de cada método a operar individualmente, enquanto opera com um feixe de laser, o teodolito proporciona um meio de controlo visual directo, incluindo o controlo de qualquer desvio ou movimento do feixe de luz.

Giro-teodolitos são teodolitos com um giroscópio suspenso capaz de identificar o Norte astronómico real, são muito utilizados em trabalhos de túneis convencionais e em *pipe jacking* de grandes dimensões. Duas questões opõem-se à sua forte utilização, sendo uma, o seu custo e outra a sua susceptibilidade a vibrações e choques.

A bússola giroscópica auxilia na execução de cursos em curva. Um sistema utiliza a combinação entre um giroscópio e um nível, instalados no escudo. Adicionalmente é medida a extensão do empurre do escudo, é medido o *Lead* e o *Roll*, sendo toda a informação obtida, processada por um computador multi-tarefa, que calcula a posição do escudo e a sua direcção de projecto.



- Posicionamento e monitorização de uma operação sem acesso humano

Onde não é possível observação e medições directas, a geração remota de informação topográfica torna-se uma necessidade. Dispositivos como teodolitos e lasers são fundamentais para a obtenção de dados topográficos, mas têm que ser complementados com outros dispositivos de medição e também com outros meios de transmissão da informação para um painel de controlo localizado remotamente a partir da face da escavação. O conjunto de dados tem que ser processado e interpretado por um operador ou por um computador e emitida uma correcção apropriada dos comandos.

Uma monitorização controlada remotamente é requerida para todos os métodos de *pipe jacking* operados remotamente. Como as funções de monitorização e de orientação devem ser estreitamente integradas com as operações do escudo, os fabricantes muitas vezes fornecem o equipamento de monitorização e orientação como parte integrante do sistema incorporado no escudo. Este equipamento também fornece um registo impresso do desempenho da operação e da máquina. Os teodolitos e as técnicas laser têm sido modificadas para atender às necessidades dos métodos de instalação controlados remotamente.

Circuitos fechados de televisão (CCTV) são amplamente utilizados em *pipe jacking* controlado remotamente. Um monitor de controlo recebe as imagens das câmaras que capturam dos mostradores localizados no escudo, especialmente as coordenadas X e Y do ponto do laser no alvo. Dois exemplos de painéis de controlo e monitores de CCTV para os operadores, podem ser vistos na Fig. 3.35. Os alvos activos podem ser de vários tipos, mas são baseados células fotossensíveis que registam o ponto do laser e fornecem a leitura das coordenadas X e Y, bem como do ângulo entre o feixe do laser e o eixo do alvo.



Fig. 3.35 - Dois tipos de painel de controlo e monitorização da frente de escavação com CCTV (Akkerman 2011)

A maioria dos sistemas controlados remotamente, tal como CCTVs e alvos activos, também incorporam inclinómetros no conjunto, os quais fornecem a informação sobre as três funções angulares (Fig. 3.36). Os inclinómetros são normalmente incorporados nos alvos activos e com a utilização de sensores, transmitem a informação para a unidade de controlo central. Uma vez processados e analisados, os dados fornecem a informação sobre a presente posição do escudo bem como uma base para a previsão da trajectória do mesmo.

Alguns empreiteiros continuam a preferir uma abordagem prática de ter operários a orientar o escudo, de acordo com a informação gerada, embora a tendência esteja virada para um controlo automático baseado em análises computacionais de dados e fornecimento de comandos de correcção pelo

computador. Embora os primeiros sistemas automáticos tenham encontrado alguns problemas, a experiência recente tem sido favorável à sua utilização. Os programas necessitam de introduzir um elemento de inteligência artificial nas decisões tomadas pelos computadores, por forma a evitarem sobre correcção e manterem uma trajectória suave. Todas as máquinas possuem as suas características conforme a geometria do escudo e a relação entre a cabeça de corte e face do escudo. As condições predominantes do solo também possuem uma influência considerável na resposta do escudo, sendo um factor a ter em conta numa correcção completamente automática.

Um inconveniente de uma monitorização com alvos laser é o facto de os alvos se situarem a alguma distância atrás da frente de escavação. Portanto, todos os dados se relacionam com essa posição e não com o ponto mais adiante do escudo. Foram então desenvolvidos sistemas modificados, utilizando espelhos e um divisor de feixes laser, em que um feixe fornece o alinhamento requerido com o alvo e o segundo feixe é direccionado para um reflector que fornece um segundo ponto com a posição prevista do centro da cabeça de corte. Mantendo os dois pontos sobrepostos, o operador consegue guiar a correcta direcção.

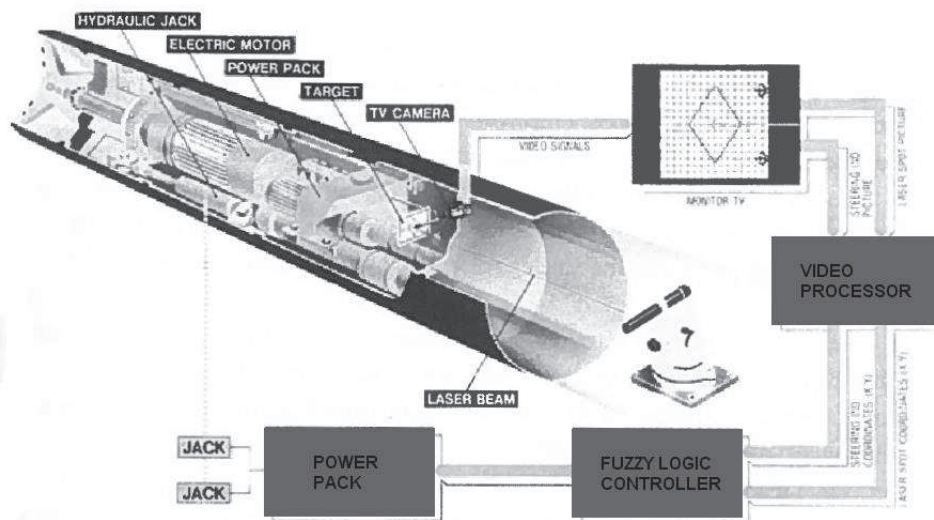


Fig. 3.36 – Sistema de monitorização e orientação com direcção automática e CCTV, adaptado de (Thomson 1993)

Fabricantes afirmam que os métodos de monitorização e controlo disponíveis, são capazes de detectar desvios de 0.1 mm, permitindo estes sistemas melhorados, tolerâncias mais apertadas que devem ser observadas e geralmente permitem aos empreiteiros trabalhar dentro de  $\pm 25$  mm com sistemas controlados remotamente para qualquer comprimento do curso do túnel. Em alguns casos são cotadas tolerâncias de  $\pm 5$  mm.

- Orientação

As características da direcção de um escudo convencional, são controladas pela geometria do escudo, o que por sua vez é influenciado pelas condições do solo. Um escudo é guiado mais facilmente quando a razão entre o seu comprimento e o seu diâmetro está perto da unidade. Contudo, em solos moles, para obter forças de deflexão necessárias para correcções de trajectórias, são necessários comprimentos superiores do escudo, podendo a razão entre o comprimento e o diâmetro aumentar para

2 ou até mesmo 3. Esta razão pode ser reduzida com a montagem de macacos de direcção de dupla acção, no interior do escudo.

Os escudos simples são construídos numa única secção, com o ajuste angular obtido entre o escudo e o primeiro tubo instalado. Escudos mais sofisticados são construídos com uma secção de guia e outra de cauda, unidas por uma ligação articulada munida de um vedante para permitir movimento angular diferencial da secção guia.

Os cilindros de macacos de dupla acção do escudo possuem cursos entre 300 e 600 mm, para impulsionar o escudo independentemente do restante conjunto e permitir um ajuste angular. A capacidade de impulsionar o escudo independentemente tem variados propósitos, podendo reduzir a força total de empurre pelo movimento de avanço separado do escudo, pode também auxiliar na estabilização da face em solos moles ou instáveis. Em rocha ou solos duros pode fornecer o impulso necessário para a cabeça de corte.

Em situações em que os macacos apenas desempenhem a função de ajuste do escudo, os cilindros possuem cursos mais curtos e menor capacidade empurre.

O posicionamento, o número de macacos e capacidade de empurre varia de acordo com o diâmetro do escudo e com o modelo do fabricante. Uma disposição comumente utilizada é a de 4 macacos dispostos a 45°, podendo outros arranjos utilizarem apenas 3 macacos. Grandes diâmetros do escudo podem necessitar de 6 ou mesmo 8 cilindros de controlo. Em escudos aberto convencionais, os ajustes diferenciais dos macacos do escudo podem ser efectuados directamente pelos operários na frente de escavação. Em escudos controlados remotamente são utilizadas válvulas electromecânicas para controlar o ajuste remotamente.

O sistema de direcção com macacos hidráulicos podem ser utilizados para corrigir os desvios do *Look-up* e do *Lead*, mas não intervêm no *Roll* do escudo. O uso de rotações horárias e anti-horárias durante a execução dos trabalhos pode ajudar a deter a tendência para o escudo rodar. Alguns escudos estão munidos com uma espécie de barbatanas de estabilização controladas hidraulicamente nos seus lados para contrariar esta tendência de rotação.

#### 3.2.3.4 Dimensões e configuração do poço de ataque

O tamanho e configuração do poço de ataque são determinados por vários factores. A largura está directamente relacionada com o diâmetro dos tubos a serem instalados, adicionando uma tolerância para espaço de trabalho e manobra. O mais normal é adicionar 2000 mm ao diâmetro externo dos tubos. O comprimento é determinado pelos comprimentos dos segmentos dos tubos a instalar e pelo espaço necessário para o equipamento de empurre. Também deve ser tomada atenção para a secção maior do escudo ou da tuneladora a ser manuseada no poço, uma vez que na maior parte das vezes estas secções são de dimensões superiores ao comprimento dos segmentos dos tubos a instalar.

É prática comum os fabricantes fornecerem a informação das dimensões dos poços necessárias para os seus equipamentos.

O custo de execução dos poços de ataque, particularmente em trabalhos profundos, comporta uma parte significativa do custo global da operação. A tendência é produzir equipamento com dimensões o mais contidas possível, por forma a poder ser operado a partir de um poço circular, poço este que pode ser prontamente adaptado para formar uma câmara de acesso permanente quando o sistema estiver em serviço.

### 3.2.3.5 Construção dos poços

A escolha do tipo de construção a utilizar na execução dos poços de acesso para *pipe jacking* depende de variados factores, tais como, a profundidade necessária, o tamanho do equipamento de escavação e das secções dos tubos a instalar, das condições do solo, do nível freático, das práticas locais e dos regulamentos de segurança.

As estruturas de suporte dos poços são normalmente projectadas e seleccionadas em conformidade com a norma DIN 4124 “Construção de poços e valas”.

A construção do fundo do poço deve ser executada de tal forma a que seja conseguido um alinhamento preciso, quer horizontal e vertical, da estação de empurre e do sistema de suporte dos tubos, bem como o fundo deve ser capaz de suportar as cargas verticais sofridas pelo tráfego ou pelo levantamento do solo. Deve ser também munido de um sistema de bombagem por forma a retirar as águas pluviais que afluírem ao poço.

Em solos com boas condições de estabilidade, os poços podem ir até profundidades da ordem dos 6 a 7 metros, podendo ser construídos com recurso a várias técnicas, sendo normalmente construídos com recurso a suporte, embora para profundidades muito pequenas segundo algumas restrições, possam ser executados sem suporte. A escavação, o suporte das paredes e o escoramento, são realizados ao mesmo tempo. Os regulamentos de segurança exigem que estas escavações e os poços deste tipo sejam devidamente suportados e contraventados. As técnicas de suporte mais utilizadas para pequenas profundidades são as de colocação de suporte vertical convencional, placas de suporte ou sistemas de suporte.

Os poços de ataque e os de recepção são projectados da mesma forma que outras escavações, tendo em conta as sobrecargas, as cargas do tráfego bem como as pressões de terras e da água. Adicionalmente, deve-se ter em conta uma tolerância para as cargas de empurre que são transmitidas à parede de reacção e ao escoramento do poço.

A teoria e prática da construção de poços de elevadas profundidades e em solos em condições condicionadas são um assunto complexo, havendo muitos casos em que é necessário recorrer a especialistas para projectar e acompanhar a implementação da técnica. Complicações à parte, existem três abordagens básicas, como ensecadeiras, caixões e estabilização prévia.

- Poços sem suporte

De acordo com a norma DIN 4124 é permitido executar poços sem a incorporação de suporte em que a profundidade das paredes verticais não seja superior a 1.25 m (Fig. 3.37 – a). Devendo o declive do terreno depositado não exceder 1/10 em solos não coesivos ou 1/20 em solos com propriedades coesivas.

Escavações até 1.75 m de profundidade são também permitidas em solos firmes ou em rocha, desde que a parte de superior, a partir de 1.25 metros medidos do fundo do poço, apresente um declive com um ângulo inferior ou igual a 45° (Fig. 3.37 – b), ou então seja contemplado um suporte nessa faixa (Fig. 3.37 – c) e o declive do terreno depositado não exceda 1/10.

Poços construídos sem suporte e com profundidades superiores às referidas devem ser executados com taludes inclinados (Fig. 3.37 – d). Independentemente das propriedades de compactação do solo, o declive dos taludes deve ter em conta as propriedades mecânicas do solo, o período em que os poços se encontram abertos e os efeitos de acções externas a que os taludes possam estar expostos.

Os ângulos dos taludes mencionados, devem ser inferiores e nunca ultrapassar os valores abaixo descritos, a menos que se realizada uma análise de estabilidade do solo.

- Solos não coesivos ou pouco coesivos  $\beta=45^\circ$
- Solos duros ou com coesão apreciável  $\beta=60^\circ$
- Rocha  $\beta=80^\circ$

As paredes devem ser menos profundas do que 1.25 m ou 1.75 m, ou os declives dos taludes devem ser mais reduzidos do que os referidos, se for expectável que a estabilidade do solo possa estar comprometida por algum motivo.

Caso exista a possibilidade dessa estabilidade das paredes não suportadas ser ameaçada pela acção da água, pela erosão, pelo gelo ou por efeitos similares, é necessário proceder à protecção adequada das superfícies expostas ou reduzir a altura das paredes ou a inclinação dos taludes.

Além do mais, a quantidade da força de empurre aplicada no talude da parede tem de ser verificada separadamente da estabilidade deste.

Construções de poços sem suporte, podem ser executadas de uma forma simples e rápida, não havendo elementos de suporte estrutural a impedir os trabalhos no poço.

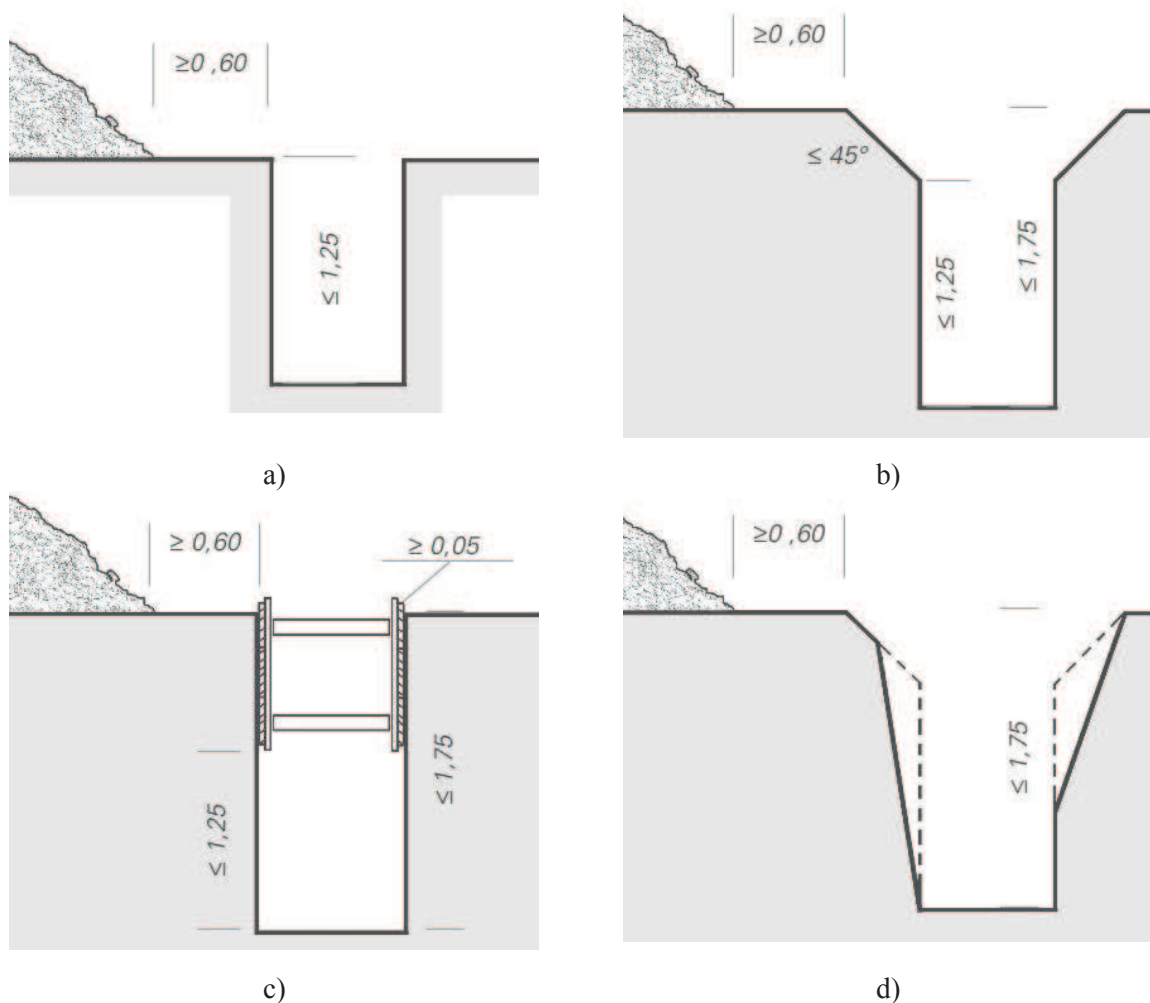


Fig. 3.37 – Escavações não suportadas, adaptado de (DIN 4124 2002-10)



Poços com profundidades inferiores a 1.25 m ou 1.75 m, são construídos apenas para trabalhos de *pipe jacking* de pequenos diâmetros ou mesmo micro túneis. Este tipo de construção de poços é de emprego preferível em locais em que não existam restrições de espaço, como em túneis sob barragens ou rios.

- Suporte vertical convencional

O suporte é executado à medida que a escavação avança, sendo colocadas pranchas de madeira entre perfis metálicos cravados ou colocando pranchas metálicas. A execução pode ser realizada em vários níveis, utilizando o suporte lateral, vigas de distribuição e escoras. Este tipo de suporte não fornece uma barreira eficiente para a infiltração de água ou partículas finas para o interior do poço, pelo que é um método mais apropriado para solos coesivos competentes. Placas metálicas com uma interligação completa em toda a sua extensão oferecem uma maior resistência e impermeabilidade. (Fig. 3.38)



Fig. 3.38 – Suporte vertical convencional em secção rectangular e circular (Bradshaw 2011)

- Sistema de suporte

A designação, sistema de suporte, descreve um tipo de suporte que é estandardizado no que respeita à concepção e dimensões, sendo realizado de elementos metálicos prefabricados de grandes dimensões. O sistema engloba perfis metálicos de canto, munidos de calhas pelas quais as placas metálicas são guiadas aquando da sua introdução, pelo que é um sistema que só pode ser utilizado para secções rectangulares. Com um nível de execução conseguem-se profundidades de construção da ordem dos 3 metros, podendo esta profundidade ser superada com a introdução de um novo nível de perfis guia e de placas metálicas.

- Placas de suporte

Placas de suporte, são placas metálicas onduladas com acabamento galvanizado ou plastificado, com uma vasta gama de dimensões, podendo mesmo ter formas curvas, pelo que se consegue, com a sua utilização, a execução de poços com secções rectas e curvas. As placas são unidas, geralmente aparafusadas, *in situ*. De modo a conferir a rigidez necessária ao sistema, são introduzidos perfis metálicos que formam caixilhos de suporte no interior do poço. Em poços totalmente circulares,



normalmente não são necessários os caixilhos metálicos para conferir rigidez, uma vez que a sua configuração por si só é suficiente. (Fig. 3.39)



Fig. 3.39 – Placas de suporte em poço de secção circular (J & J Boring, Inc. 2011)

- Ensecadeiras

Uma ensecadeira é uma estrutura de suporte temporária, projectada para conter o solo adjacente e evitar a percolação de água para o interior da escavação, ou pelo menos a maior quantidade possível. Essencialmente, trata-se da construção de uma parede contígua no solo ao mesmo tempo que a escavação avança. A forma mais conhecida de ser executada é com o recurso à cravação de estacas prancha, em que placas de aço interligadas, são cravadas até profundidades bastante abaixo do fundo poço.

Este tipo de construção é utilizado tanto em poços de ataque como de recepção, possuindo duas vantagens primordiais para o *pipe jacking*. Em primeiro lugar, os poços podem ser executados em planta rectangular permitindo a utilização de segmentos de tubos a serem empurrados, com longos cursos. Em segundo lugar, em solos fracos, as estacas prancha podem ser realizadas amplas o suficiente para que sejam geradas forças de empurre necessárias para a introdução de grandes diâmetros ou de longas sequências de tubos.

Embora as ensecadeiras realizadas com estacas prancha sejam muito utilizadas para trabalhos de segmentos de tubos longos e de grandes diâmetros, não se tornam económicas para a execução de trabalhos de pequenos diâmetros, uma vez que as próprias estacas prancha têm um custo elevado e para mais são acrescentados os custos relativos ao seu transporte para o local e da mobilização dos equipamentos para a sua introdução e remoção. A parte dos factores económicos, outra desvantagem do uso de estacas prancha reside no facto de ser difícil a sua colocação em espaços urbanos sem que sejam primeiro desviadas as outras infra estruturas pré existentes no subsolo. Uma vez terminado o trabalho de *pipe jacking* é necessário preencher o interior da ensecadeira com o solo e retirar as estruturas de suporte bem como as estacas prancha, podendo provocar assentamentos nas proximidades do local, devido à vibração e aos vazios decorrentes da extracção.

Se os trabalhos se desenrolam abaixo do nível freático existe o risco de rotura do fundo devido a levantamento hidráulico, durante a escavação, podendo mesmo levantar a laje de fundo depois do poço concluído. Por forma a evitar este levantamento, a cravação das estacas abaixo do nível do fundo do

poço pode ser exigida, pois o seu efeito de equilíbrio proporciona resistência à tendência que as estacas têm em movimentar-se em direcção ao interior do poço enquanto a enscadeira é escavada. Na maioria dos solos alguma percolação vertical pode ser controlada por bombagem, embora em solos mais permeáveis seja necessário um rebaixamento prévio do nível freático ou injeções para controlo freático. (Fig. 3.40)

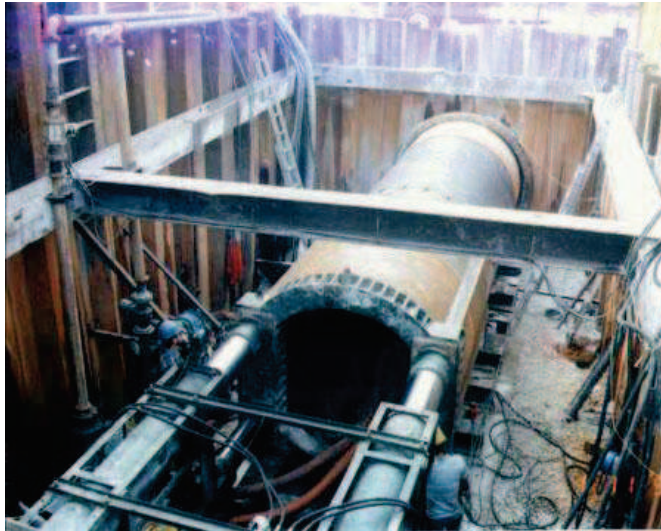


Fig. 3.40 – Suporte em estacas prancha de um poço rectangular (Huxted 2011)

Alternativamente às estacas prancha, as enscadeiras podem ser realizadas com recurso a estacas secantes ou a paredes moldadas, o que apenas ocorre ocasionalmente em trabalhos de *pipe jacking*. (Fig. 3.41)



Fig. 3.41 - Enscadeira realizada em estacas secantes (TBM 2011)

- Caixões

A característica essencial de um caixão reside no facto de a estrutura circular ser construída à superfície e depois afundada com um todo, até a profundidade pré-estabelecida, onde permanece parte

do trabalho permanente. A escavação é executada ao mesmo tempo que o caixão é baixado, normalmente debaixo de água, podendo por vezes o trabalho ser executado com ar comprimido.

A técnica de escavação com caixões é muito utilizada desde há vários anos na construção de fundações profundas ou em poços para túneis ou minas, e tem sido utilizada numa menor escala em aplicações de *pipe jacking*. Para pequenas secções, as secções dos caixões são pré-fabricadas e montadas no local, sendo realizadas *in situ* para grandes dimensões.

O afundamento dos segmentos é auxiliado com a introdução de um anel de diâmetro ligeiramente superior, na parte inferior dos segmentos, munido de um calço de corte. À superfície, um anel de betão é moldado à volta do caixão, mas separado do segmento, por forma a actuar como guia durante a introdução do sistema no solo. (Fig. 3.42)

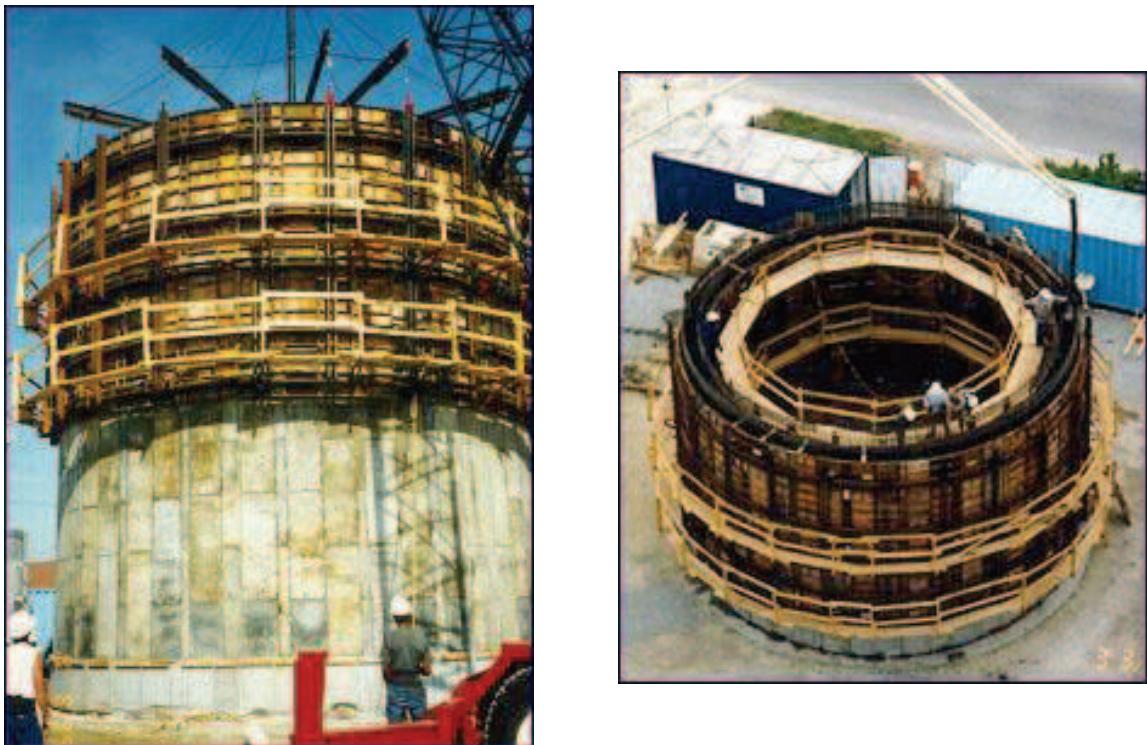


Fig. 3.42 – Suporte de poços em caixão (Bradshaw 2011)

- Estabilização prévia

A redução do nível freático é o método mais utilizado e o mais simples, para a estabilização de solos granulares com um elevado nível freático. O nível freático é baixado através de bombagem a partir do fundo do poço, bombagem esta que pode ser realizada continuamente a partir de um ponto de bombagem, para profundidades até 6 metros, ou através de poços profundos, quando é necessário alcançar profundidades superiores (Fig. 3.43). No entanto, para solos difíceis as opções de estabilização são mais complexas, sofisticadas e especializadas, podendo o solo ser estabilizado por injeção de químicos ou calda de cimento (por exemplo por *jet grouting*) (Fig. 3.44). Em situações que o nível freático seja muito elevado e os solos sejam siltosos muito finos para lhes ser adicionada calda de cimento, a congelação do solo é uma solução, embora seja bastante dispendiosa e necessite de um trabalho muito especializado e específico no local de execução.





Fig. 3.43 – Rebaixamento do nível freático por bombagem (Bradshaw 2011)

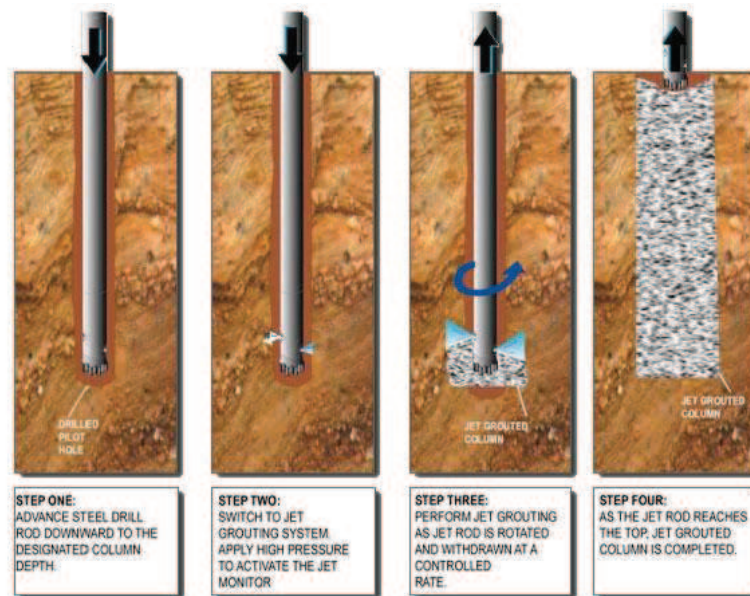


Fig. 3.44 – Estabilização de solo por *jet grouting* (Layne 2011)

### 3.2.4 Zona de equipamentos à superfície

A zona de equipamentos à superfície é composta pela área de terreno que circunda a entrada do poço de ataque à cota térrea, sendo organizada devidamente de modo a funcionar como zona de suporte de determinadas funções e serviços, como é o caso da recepção, tratamento, armazenamento e eliminação dos despojos da escavação; das unidades primárias de alimentação de energia eléctrica, hidráulica e de ar comprimido; das unidades de mistura de substâncias lubrificantes e equipamentos de injeção; manuseamento e armazenamento de tubos; e da estação de controlo central.

#### 3.2.4.1 Manuseamento dos despojos de escavação

Os métodos de elevação do solo escavado no curso do túnel, desde o fundo do poço de ataque até à superfície, podem ser de variados tipos, desde contentores simples içados por guindastes a condutas de elevação sob pressão, descarregando o material em forma de lama em contentores de armazenamento para posterior eliminação ou em tanques de separação. Quando é utilizada a bombagem de lamas, o equipamento à superfície inclui meios de separação da lama bentonítica do solo misturado, para posterior reutilização das lamas bentoníticas, podendo esta separação ser feita por sedimentação, centrifugação, desidratação ou por meio de filtros prensa. A lama que só contém o solo escavado é transferida para funis de carga que alimentam contentores para eliminação da lama do local e a bentonite regressa para o sistema de bombagem de lamas para a escavação.

#### 3.2.4.2 Unidades primárias de alimentação

As unidades primárias de alimentação fornecem energia eléctrica e hidráulica, necessárias ao funcionamento dos motores da escavação, aos sistemas hidráulicos, aos sistemas de transporte dos produtos da escavação, aos componentes de elevação e a outros mecanismos que necessitem do seu fornecimento. Em alguns trabalhos pode ainda ser necessário a existência de um compressor de ar para alimentar equipamentos pneumáticos de corte, de transporte de lamas ou para câmaras de pressão. Os equipamentos que realizam a mistura e a injeção dos fluidos lubrificantes também se encontram localizados nesta área, junto da abertura do poço de ataque, à superfície. (Fig. 3.45)



Fig. 3.45 – Unidade primária de alimentação hidráulica, Power Pack A100Q (Akkerman 2011)

Em situações em que o espaço não abunda, ou em instalações mal projectadas ou mal organizadas, a área ocupada pelas componentes supracitadas pode-se tornar extensa. A necessidade de lugares mais pequenos, com um impacto menor, por forma a reduzir a interferência e a minimizar a interrupção da superfície levou à exigência de um trabalho mais compacto. Como tal, o equipamento de *pipe jacking* tem sido produzido numa base integrada em que todos os componentes fazem parte de um sistema. Modificar um contentor *standard*, é cada vez mais comum, incorporando o sistema de elevação, energia, equipamento de lubrificação, monitorização e controlo.

Com a operação de diâmetros mais pequenos, o painel de controlo localiza-se normalmente à superfície, com toda a informação de monitorização e comandos de controlo, sob controlo de um operador ou de um sistema computadorizado. Com a racionalização dos tubos e do armazenamento do solo escavado, é possível acomodar uma configuração completa de *pipe jacking* numa área à superfície de cerca de 20 m por 4 m, ou menos, em situações em que o espaço seja particularmente limitado.

### 3.2.4.3 Manuseamento dos tubos

A posição inicial do escudo e do equipamento de empurre e subsequentemente dos segmentos de tubos a colocar requerem um tipo específico de sistema de elevação e transporte. As gruas móveis são amplamente utilizados tomando os cuidados necessários para que o equipamento a ser manipulado esteja dentro dos limites da capacidade de elevação do sistema. Em algumas situações dispendiosas gruas móveis podem-se revelar pouco económicas, especialmente em situações em que sejam subutilizadas. Um sistema de grua móvel com cavaletes pode-se tornar económico em situações em que sejam necessários longos cursos e grandes diâmetros de tubos. Para diâmetros mais pequenos, este sistema normalmente encontra-se integrado no tipo de sistema referido no ponto anterior. (Fig. 3.46)



Fig. 3.46 – Exemplo de uma zona de armazenamento e manuseamento dos tubos a colocar no poço de ataque (Herrenknecht 2011)

Restrições de espaço normalmente limitam o número de segmentos de tubos que podem ser armazenados no local, podendo ser necessária uma zona secundária de armazenamento nas imediações do local de entrada do poço por forma a permitir uma frequente reposição de *stock* no local de manuseamento. Os tubos são preparados com os *packers* das juntas, fixados na face das juntas antes de darem entrada no poço, sendo também posicionados os tubos e cabos temporários, como os tubos de carga e descarga da bombagem de lamas. A disposição do sistema de suspensão (lingagem) dos tubos também deve ser tido em consideração, pois para além de satisfazer as necessidades de segurança aplicáveis, também tem que ser projectado para facilitar um posicionamento rápido e preciso dos tubos no fundo do poço de ataque.



### 3.3 Investigação local e informação necessária das condições do solo

Aquando do projecto ou da orçamentação de um trabalho a ser levado a cabo com *pipe jacking*, é necessária uma investigação completa do local, tanto factual como interpretativa, em forma de relatório, de modo a determinar as características dos solos susceptíveis de serem encontrados, bem como do nível freático, em detalhe, nas redondezas do espaço envolvente.

Tanto a investigação da superfície do local a ser intervencionado, bem como a investigação do subsolo, são pré-requisitos para o projecto de uma construção subterrânea, sendo os seus resultados que confirmarão, ou declinarão, a informação geológica e outras informações do solo recolhidas na fase de estudo prévio e providenciarão os dados necessários para a fase de projecto final.

A investigação local deve ser dirigida por um especialista geotécnico devidamente qualificado ou por um consultor em geotecnia, com experiência considerável em esquemas de execução de túneis, sob a direcção geral do projectista do túnel.

#### 3.3.1 Estudo de secretária

Para todos os esquemas, o estudo de secretária deve ser realizado apreciando a literatura existente, mapas, fotografias aéreas, planos de utilização e investigações locais já existentes. Este tipo de estudo é essencial para ajudar a compreender os aspectos geológicos e geotécnicos mais gerais, e deve ser utilizado para determinar o âmbito de qualquer investigação intrusiva.

#### 3.3.2 Estudo do subsolo

Além de confirmar os resultados da investigação local, o estudo do subsolo quantifica as propriedades do solo e os regimes das águas freáticas nele existente. Esta infirmação é fundamental para um projecto eficiente e do lado da segurança do trabalho de *pipe jacking* e será a base das decisões que serão tomadas acerca dos elementos de projecto a seguir listados:

- Comportamento do subsolo e escolha do tipo de escudo da tuneladora;
- Escolha das cabeças de corte;
- Método de eliminação dos despojos de escavação;
- Sistema de fluídos (água, lama ou polímeros);
- Cálculo das forças de empurre e número de estações de empurre intermédias;
- Método da construção dos poços;
- Espaçamento dos poços;
- Capacidade de reacção para as forças de empurre nos poços;
- Redução do nível freático nos poços;
- Paredes de reacção.

Os métodos para a obtenção da informação detalhada sobre o solo e condições hidrogeológicas, incluem furos de sondagem para recolha de amostras a serem ensaiadas em laboratório, ensaios de campo, ensaios não destrutivos e técnicas geofísicas.

Dependendo do tipo de solo, diferentes parâmetros podem ser considerados, como tal a PJA sugere a distribuição representada na Tabela 3.2, abaixo apresentada.

Tabela 3.2 – Parâmetros a serem considerados em relação a cada tipo de solo (PJA 1995)

	Solos não coesivos	Solos coesivos	Solos mistos	Materiais de enchimento	Rocha
Peso específico e teor em água	•	•	•	•	•
Ângulo de atrito	•		•	•	
Distribuição granulométrica	•	•	•	•	
Abrasividade	•	•	•	•	•
Coesão		•	•	•	
Tipos e proporções dos minerais	•	•	•	•	•
Ensaio de penetração normalizada-SPT	•	•	•	•	
Permeabilidade e natureza dos fluxos de águas freáticas	•		•	•	•
Constituintes tóxicos/perigosos do subsolo/águas freáticas	•	•	•	•	•
Frequência de aparecimento e propriedades físicas de blocos de maiores dimensões	•	•	•	•	•
Ensaio de pressão	•		•	•	•
Presença de gases				•	•
Resistência à compressão					•
<i>Rock Quality Designation-RQD</i>					•
Registo de amostragem (TCR, SCR, FI)					•
Resistência à tracção					•
Energia específica (escavabilidade)					•
Durabilidade					•
Descrição geológica	•	•	•		•
Índices de plasticidade (SL, PL, PI)		•	•		

### 3.3.2.1 Custos da investigação

Nos Estados Unidos, o *US National Committee for Tunneling Technology* estudou os procedimentos para a investigação local e a sua influência no trabalho no subsolo. A partir das evidências surgiram duas observações principais. Primeiro, os projectos que possuem o maior comprimento de sondagens

realizadas têm um preço adjudicatário mais perto do preço de oferta, do que os projectos com menor número de investigação. Em segundo lugar, os projectos com melhor estudo e investigação local possuem menos reclamações. Entre outras coisas, o comité teceu as seguintes recomendações:

- O nível do custo de investigação local deve ser de cerca de 3% do custo estimado de construção. Isto contrasta com o valor de 1% citado por engenheiros e clientes;
- A quantidade de furos de sondagem para investigação do local, deve possuir o comprimento total de cerca de 1.5 vezes o comprimento do túnel.

Embora o estudo do comité dissesse respeito à construção de túneis de maiores dimensões, os comentários parecem ser igualmente válidos para *pipe jacking*.

### 3.3.2.2 Recolha de amostras e ensaios em laboratório

Sondagens realizadas com a recolha de amostras intactas ou remexidas carecem de posteriores ensaios laboratoriais das mesmas amostras.

Os furos de sondagem devem ser realizados nos locais dos possíveis poços de acesso e em pontos intermédios espaçados de 80 a 100 metros. Em casos em que as condições do terreno sejam muito variáveis pode ser necessário realizar sondagens adicionais ou recorrer a outros meios de investigação para correlacionar os resultados.

A correcta posição na qual se devem realizar as sondagens no terreno é a posição do alinhamento do túnel a executar. Os empreiteiros têm-se deparado com custos adicionais quando os furos não são realizados sobre o alinhamento e quando se procede a um incorrecto preenchimento do furo após a realização da sondagem. Como regra de boa prática, em sondagem realizadas ao longo do alinhamento do túnel, estas devem-se prolongar em profundidade até pelo menos 2 metros ou 2 diâmetros, consoante o maior comprimento, abaixo da cota da superfície inferior do túnel a realizar. É recomendado ainda uma amostragem contínua entre um diâmetro acima e um diâmetro abaixo do tubo proposto.

As sondagens realizadas nos locais dos poços de acesso devem ser prolongadas até 4 metros abaixo da cota do fundo do poço, valor este que aumenta de acordo com o diâmetro, para poços com diâmetros superiores a 5 metros.

A obtenção de sondagens em áreas congestionadas pode acarretar dificuldades físicas substanciais, bem como dificuldades em termos de obtenção de licenças para a realização dos furos, em evitar interferências com o tráfego à superfície, em cumprir as precauções de segurança bem como em evitar estruturas enterradas no local do furo.

Testes laboratoriais realizados sobre as amostras intactas ou remexidas, previamente recolhidas, permitirão gerar informações dos materiais atravessados, de variadas categorias.

- **Propriedades físicas:** composição mineral; peso volúmico; teor de água; granulometria; características das formas das partículas; limites de consistência ou de Atterberg.
- **Propriedades hidráulicas:** permeabilidade; condutividade hidráulica; características dos fluídos dos poros.
- **Propriedades mecânicas:** limites de compactação; propriedades de compactação; constantes elásticas; resistência ao corte.

Com este rol de informações um engenheiro geotécnico experiente é capaz de identificar e descrever o tipo de solo, bem como classificar e quantificar as suas propriedades. No entanto, é necessário ter sempre presente que os resultados obtidos em laboratório dizem respeito às amostras e não propriamente ao solo existente no local, uma vez que podem haver grandes diferenças devido à protecção, encapsulamento, manuseamento e à reconstituição das amostras. É de notar também que alguns testes fornecem uma comparação entre amostras, não traduzindo realmente o comportamento do solo tal como ele se encontra. Os sistemas de classificação dos solos podem variar consoante os países em que são realizadas as investigações, ou mesmo entre diferentes autoridades dentro do mesmo país, o que pode levar a uma variação da descrição do mesmo material, de um sistema para outro. O sistema de classificação mais comumente utilizado é o Sistema Unificado, ou suas variantes.

### 3.3.2.3 Recolha de amostras e ensaios *in situ*

Vários métodos de ensaios no campo podem fornecer informação de grande valor, em especial quando relacionadas com outras fontes. Aquando da realização de furos de sondagem são realizados vários ensaios de campo, como a observação visual das amostras, ensaios de resistência e medições do nível freático. A permeabilidade pode ser determinada nos furos das sondagens com recurso ao ensaio de *Lefranc* ou ao de *Lugeon*. Os ensaios pressiométricos, embora complexos, podem fornecer informações consideráveis sobre o módulo de deformabilidade ou outras características do solo.

Um ensaio que pode ser realizado com a recolha de amostras, é o ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) que fornece informações sobre a resistência do solo a partir dos valores de N obtidos, os quais dizem respeito ao número de pancadas necessário para cravar um amostrador normalizado, com o impacto de um peso também ele normalizado que é deixado cair de uma determinada altura. Os resultados deste ensaio podem ser influenciados por várias variáveis. O número de pancadas pode ser correlacionado, ainda que de um modo grosseiro, com várias propriedades como o módulo de elasticidade, a coesão em solos finos e o ângulo de atrito em solos granulares.

### 3.3.2.4 Ensaios *in situ*

De entre uma vasta gama de ensaios *in situ*, os mais utilizados são os ensaios com cone penetrómetro, o ensaio CPT (*Cone Penetration Test*) e o CPTU (*Cone Penetration Test* com piezocone), uma vez que permitem a determinação do tipo de solo, a sua resistência, o grau de compactação. No caso do ensaio com piezocone, ainda é possível determinar a pressão intersticial da água.

No ensaio CPT, um cone normalizado na extremidade de uma série de varas é empurrado para o interior do solo a uma velocidade constante, sendo realizados registos contínuos ou intermitentes da resistência à penetração do cone e sendo medida tanto a resistência de ponta, como a resistência lateral.

O ensaio CPT possui três aplicações principais, sendo elas: a determinação do perfil do solo e identificação dos solos atravessados; a interpolação das condições do solo entre furos de controlo; e a avaliação de parâmetros geotécnicos do solo e estimação da capacidade de carga e de assentamento.

A profundidade de penetração do ensaio é controlada pelas condições do maciço. São utilizados equipamentos leves para a penetração em argilas e siltes bem consolidados e algumas areias soltas ou medianamente compactas. Equipamentos pesados são utilizados em argilas duras e gravilha solta, embora não tenham grande progresso em gravilha compacta. Partículas granulares de grandes

dimensões podem impedir a progressão do ensaio, sendo a progressão em rocha limitada à sua superfície superior.

Os solos são identificados pela correlação empírica entre o tipo de solo e a razão da resistência lateral e de ponta do cone. Os parâmetros geotécnicos são estimados igualmente a partir de correlações empíricas. Em alternativa, os resultados do ensaio podem ser utilizados directamente para estimar a capacidade de carga e assentamentos, também com bases empíricas. O ensaio CPT possui variadas vantagens em relação ao método SPT utilizado em combinação com furação e amostragem. As principais vantagens são:

- Proporciona um registo contínuo, ou virtualmente contínuo das condições do terreno, embora indirecto;
- Evita a perturbação do solo associada aos fenómenos de furação e amostragem, que ocorrem previamente à aplicação do SPT;
- Qualquer perturbação resultante provocada pelo avanço do cone é consistente entre vários ensaios efectuados;
- São conseguidas reduções de custos com a utilização do CPT.

Em prática a utilização do CPT permanece essencialmente empírica. Os parâmetros mais relevantes são o ângulo de resistência de corte e características de deformação em solos não coesivos, a resistência não drenada e o módulo de deformabilidade não drenado em solos coesivos. Uma das mais importantes utilidades do ensaio CPT é o de delinear o perfil do solo atravessado, o que com este ensaio é conseguido com bastante fidelidade.

### 3.3.2.5 Técnicas geofísicas

Os métodos de investigação geofísicos são utilizados na interpretação das condições geológicas e hidrogeológicas ao longo do alinhamento proposto, assentando em seis tipos de avaliação: eléctrica, sísmica, electromagnética, por radar, magnética e gravimétrica. Na prática, os métodos sísmicos são os mais desenvolvidos e mais amplamente utilizados para a avaliação das condições do terreno, embora tenham vindo a ser despendidos uma grande quantidade de esforços na investigação no método por radar. Muitos dos outros métodos são utilizados na localização de objectos existentes no subsolo como condutas e cablagens.

Os métodos sísmicos exploram as diferentes características dos solos e das rochas que afectam a velocidade de propagação das vibrações que passam por esses materiais, podendo operar com uma vasta gama de fontes de vibração desde ressonância, reflexão, refacção e altas frequências.

A investigação sísmica pode ser realizada a partir da superfície ou a partir de furos de sondagem, isoladamente ou em combinação. As ondas são originadas através de uma pequena carga explosiva ou a partir da pancada de um martelo numa placa de metal, sendo posicionados geofones na superfície em intervalos mais ou menos espaçados correspondentes à profundidade de investigação requerida. Estes geofones detectam as ondas refractadas e transmitem o sinal ao sismógrafo, que produz uma linha de movimento e tempo.

Os métodos sísmicos podem dar uma grande ajuda na identificação de maiores alterações nos estratos. São aplicados comumente no traçado do perfil da *bed rock* ou características do subsolo, como a existência de cavernas ou grandes blocos. É importante que os resultados sejam estreitamente

correlacionados com a investigação em furos de sondagem e se necessário comparados com os provetes extraídos ou furos de sondagem adicionais em situações críticas

O método por radar GPR (*Ground Probing Radar*), também conhecido como *Ground Penetration Radar* ou *Ground Scanning Radar*, envolve a transmissão de um impulso de uma radiação electromagnética por via de uma antena direccional e a medição dos sinais reflectidos indicando a profundidade e localização relativa dos objectos. Os sinais são posteriormente transmitidos a uma unidade de controlo onde são amplificados e filtrados antes do processamento digital. No entanto o GPR possui algumas limitações práticas, como:

- O sistema é complexo e difícil de operar;
- A profundidade de penetração é limitada a cerca de 5 metros e a resolução dos objectos diminui com o aumento da profundidade;
- A interpretação dos dados requer um especialista;
- A penetração é limitada em solos com água, uma vez que a água é uma boa absorvente deste tipo de radiação electromagnética.

#### 3.3.2.6 Informação obtida nos ensaios

Os três elementos mais importantes da informação recolhida em ensaios dizem respeito a:

- Resistência para argilas, resistência não drenada e peso volúmico para os solos granulares;
- Localização do nível freático, em particular para solos granulares;
- Variação do tipo de solos ao longo do alinhamento.

Para os solos coesivos, a resistência não drenada é determinada em laboratório a partir de amostras intactas de tamanho suficiente. Em argilas sobre consolidadas ou fissuradas, pequenas amostras podem apresentar uma resistência não drenada sobre estimada. As leituras, a partir do ensaio CPT, podem ser convertidas em resistências. No entanto os resultados para as argilas devem ser traduzidos cuidadosamente, uma vez que a maioria é anisotrópica, isto é, a resistência medida no eixo horizontal é diferente da medida no eixo vertical. A resistência não drenada pode ser medida em poços de ensaio utilizando penetrómetros ou o ensaio de corte rotativo (*Vane Test*).

Os limites de *Atterberg* (limites de plasticidade e de liquidez) e o teor de água natural apenas podem ser determinados em laboratório.

Nos solos granulares, a curva granulométrica e as características químicas podem ser determinadas em laboratório. Estas características, juntamente com medições de permeabilidade local, provavelmente fornecerão a única informação útil para os solos granulares. Na curva granulométrica, a proporção de materiais finos é importante na medida em que a permeabilidade é determinada pela percentagem de 10% a 20% das partículas do solo. Algumas partículas de maiores dimensões presentes no solo não são recolhidas pelas técnicas de amostragem, devendo ser registadas no registo de perfuração de modo a serem tidas em conta na avaliação da máxima dimensão das partículas. Desde que a curva granulométrica é determinada ao longo de toda a gama de tamanhos das partículas, o coeficiente de permeabilidade pode ser relacionado empiricamente com a curva granulométrica.

Em rocha dura (intacta ou com baixa meteorização), as amostras são recolhidas por perfuração rotativa com a introdução de um fluxo de ar ou de água no interior do mecanismo de furação. O espaçamento de fracturas ou o RQD (*Rock Quality Designation*) pode ser registado. O RQD é a percentagem da



razão entre o comprimento total dos pedaços de rocha recolhidos com tamanho superior a 100 mm e o comprimento total da amostra retirada. A Tabela 3.3 apresenta os termos descritivos utilizados pelo RQD. A sua resistência à compressão é determinada através de ensaios. Os termos descritivos para a resistência à compressão são apresentados na Tabela 3.4. Para rochas brandas, como margas ou crés, o grau de meteorização é de elevada importância, sendo de maior valor a execução de poços ensaio do que furos de sondagem.

Tabela 3.3 – Temos descritivos para valores de RQD (Thomson 1993)

RQD (25%)	Descrição
0 - 25	Muito fraco
25 - 50	Fraco
50 - 75	Razoável
75 - 90	Bom
90 - 100	Excelente

Tabela 3.4 – Termos descritivos para valores de resistência à compressão (Thomson 1993)

Resistência à compressão (MN/m <sup>2</sup> )	Descrição
<1,25	Muito fraco
1,25 - 5,0	Fraco
5,0 - 12,5	Moderadamente fraco
12,5 - 50,0	Moderadamente forte
50,0 - 100,0	Forte
100,0 - 200,0	Muito forte
>200	Extremamente forte

### 3.3.3 Investigação local

#### 3.3.3.1 Tipos de investigação

As entidades de utilização, os engenheiros e os empreiteiros necessitam de conhecer a localização e o estado de redes existentes no subsolo bem como de cabos ou tubos abandonados. Necessitam ainda de conhecer os detalhes de outras estruturas realizadas anteriormente no espaço subterrâneo, como fundações, câmaras subterrâneas, ruínas enterradas ou mesmo vazios. Estas informações podem ser obtidas pela pesquisa de registos existentes, pela inspecção do local ou por variados tipos de investigação local.

Registos do local apenas são fidedignos se forem precisos e estiverem actualizados. Em áreas urbanas particularmente, instalações de serviços têm sido realizadas desde há cerca de 200 anos, mas sem surpresa, os registos de várias dessas instalações nunca foi realizado, outros foram perdidos ou ainda destruídos. Seria optimista assumir que esses registos têm sido meticulosamente actualizados sempre que são efectuadas alterações causadas pela sua danificação, manutenção ou derivação. Ainda assim, bons registos do local podem ser uma valiosa fonte de informação.

Em relação à inspecção do local, sinais superficiais como coberturas e câmaras, marcos e traços de restabelecimento, indicarão o alinhamento das várias redes de serviços, embora condutas pressurizadas ou cablagens possam divergir consideravelmente de um alinhamento recto entre dois pontos fixos. Avaliar a profundidade das instalações pode ser mais difícil, mas geralmente requisitos normalizados para a profundidade de recobrimento foram seguidos na execução das condutas. O levantamento autorizado do recobrimento pode proporcionar uma útil informação da profundidade, em especial em condutas de esgotos.

No que diz respeito à investigação local, furos de inspecção são a maneira mais simples de localizar tubos e cablagens existentes. Dispositivos de localização mais sofisticados podem fornecer leituras muito mais precisas, podendo ser baseados num dos quatro princípios principais: electromagnetismo, acústico, radar ou termografia de infravermelhos. Podem ser utilizados tanto na fase de inspecção com o objectivo de delinear e localizar e durante a fase de execução em que o objectivo será evitar. Os dispositivos electromagnéticos são mais utilizados na localização de serviços, onde tubagens metálicas e cabos podem ser delineados de um modo relativamente fácil. Para tubagens não metálicas, uma sonda inserida na instalação pode ser monitorizada por localizadores à superfície, um método útil para revelar o alinhamento e a profundidade de condutas de esgotos.

Uma utilização da energia acústica tem sido na aplicação do fenómeno do martelo de água, pela indução de um impulso energético num tubo plástico com água, sendo o sinal captado por um sensor sísmico.

O GRP utilizado na análise do solo, tem sido desenvolvida para a localização de serviços existentes, apesar do considerável progresso com este método, alguns relatórios sugerem que é conseguida uma taxa de sucesso da ordem dos 90%.

A termografia de infravermelhos não tem sido procurada para a localização de serviços, como é considerada excessivamente sensível às condições externas.

### 3.3.3.2 Pontos de conflito com estruturas subterrâneas

O método de *pipe jacking* é mais propenso ao conflito com infra estruturas enterradas ou outras estruturas subterrâneas, em três aspectos:

- Pela interferência com estruturas enterradas na área de construção dos poços;
- Pelo encontro directo de outras estruturas durante a execução;
- Pelos danos indirectos causados em estruturas pelo movimento do solo que pode originar.

Em redor dos poços, definir e localizar as infra estruturas é relativamente simples, requerendo técnicas de pesquisa normais, embora poços de inspecção possam ser necessários para confirmação. Com bastante frequência, tubagens e cablagens existentes têm de ser desviadas para fora da área do poço a realizar.

Mais sério é ir em direcção directamente contra uma conduta ou estrutura existente. Além das consequências de algum estrago para a própria estrutura é o problema de como lidar com um objecto imóvel que se encontra directamente no alinhamento. Mesmo que fosse possível o desvio de uma conduta existente seria um processo bastante moroso e de elevado custo. A alternativa, igualmente de custo elevado, seria abortar o trabalho, o que implicaria a perda da tuneladora e a procura de uma alternativa para o alinhamento da nova conduta. Prevenção, através de profunda investigação e planeamento, será melhor que encontrar uma alternativa. Para a investigação de profundidades superiores a 5 metros são necessários equipamentos e operadores especializados. Como a localização se torna mais dificultada com o aumento da profundidade, maior confiança tem que ser depositada nos registos das infra estruturas.

Felizmente, poucas infra estruturas de serviços são deixadas às profundidades das condutas de esgotos. A investigação pode portanto ser concentrada nestas condutas que provavelmente se encontram a maiores profundidades. Estes são susceptíveis de ser colectores de esgotos e águas pluviais e de abastecimento de gás e de água. Cabos de fibra óptica são também posicionados a grande profundidades por forma a providenciar uma maior protecção, mas como estes são recursos valiosos e de origem recente, os seus registos são normalmente de boa qualidade. Contudo, com o passar dos anos, um certo número de cabos e condutas estratégicas mais profundas tem sido colocadas pelos governos e por forças militares, o que faz com que os registos sobre o seu paradeiro possam não estar sob o domínio público, mas normalmente as autoridades municipais possuem uma boa ideia da sua existência, se não mesmo da sua precisa localização.

No que diz respeito aos danos indirectos causados pelos movimentos do solo, a necessidade é verificar a condição das tubagens existentes, pois algum movimento ou perturbação pode causar a rotura ou a abertura de fendas em condutas corroídas ou rígidas, como as de ferro fundido. A informação sobre a condição não é sempre conhecida ou prontamente acessível pela parte do proprietário das condutas. Contudo, o conhecimento da idade, tipo de tubagem e das condições do solo já é um bom começo, a experiência pode ajudar ainda mais.

Sistemas de *pipe jacking* bem escolhidos e habilmente operados, têm vantagens sobre métodos de escavação em vala ou mesmo sobre outros métodos de execução de túneis, na minimização de movimentos do solo. Por esta razão, os métodos de empurre, têm sido especificamente escolhidos para o cruzamento relativamente próximo de fundações ou de condutas existentes. Contudo, métodos de deslocamento não deviam ser utilizados próximo de estruturas uma vez que criam movimento no solo envolvente. A proximidade dependerá das condições do solo e da quantidade de solo a ser deslocado, mas é sugerido um mínimo de 1 metro de folga.



# 4

## DESCRIÇÃO E MODELAÇÃO DO OBJECTO DE ESTUDO

### 4.1 Descrição do objecto de estudo

A modelação do comportamento de um túnel e da interacção com o maciço envolvente, durante a sua execução com o recurso à técnica de *pipe jacking*, é um processo um tanto ou quanto complexo. A metodologia ideal para a modelação seria uma modelação completa em 3 dimensões com a análise de tensões e deslocamentos em cada uma das componentes do espaço. Como tal não foi possível de ser realizado, decidiu-se por uma simulação de uma situação em 3 dimensões, modelada em duas dimensões com recurso ao modelo axissimétrico, em que todo o modelo é definido em torno de um eixo de revolução.

Numa primeira fase, de forma a aferir a modelação no programa de cálculo Phase<sup>2</sup>, foi necessária a comparação entre um modelo simulado no programa e uma solução teórica existente para uma abertura de um túnel, neste caso a solução de Kirsch, obtida para o estado plano de deformação, com um estado de tensão da mesma ordem de grandeza.

Em termos de geometria, dentro dos valores comerciais para tubos de betão a serem aplicados com recurso à técnica de empurre, foi adoptado um tubo com diâmetro exterior de 3000 mm. As fronteiras do solo a ser modelado devem encontrar-se a uma distância suficiente da abertura, de modo a que as variações de tensões e deslocamentos sentidos no maciço durante o cálculo não sejam sentidas ao nível das fronteiras. Como tal, para as fronteiras no plano transversal ao desenvolvimento do túnel, considerou-se que estas se deveriam localizar a uma distância de 10 vezes o diâmetro a partir da extremidade do tubo. Neste caso, a distância mínima entre o exterior do túnel e a fronteira modelada, será no mínimo 30 metros.

### 4.2 Propriedades do material a atribuir ao maciço envolvente

Uma vez que o modelo em estudo não representa um caso real concreto, ou seja, a representação de uma situação na qual foram efectuados ensaios prévios de modo a determinar as propriedades dos materiais existentes no local de execução, irão aproximar-se as características do modelo com as de um caso real já executado. Neste caso irá ser utilizado como referência, o caso do exutor submarino realizado em Matosinhos, já referido no ponto 1.2.1, uma vez que foram efectuadas prospecções geotécnicas para identificação dos materiais existentes à cota de execução do túnel, tendo sido essas informações disponibilizadas.

Como tal, por análise dos documentos respeitantes à apresentação do projecto de execução, gentilmente disponibilizados pelo GEG, ao nível da cota de soleira até uma cota de 5,5m acima da cota de soleira do poço de ataque, zona onde se iniciará a construção do túnel, está-se na presença de uma rocha granítica pouco alterada a sã. Pelos registos de sondagens realizadas, pode-se referir que se está na presença de um granito gnaíssico W3, medianamente alterado por vezes pouco alterado.

Tomando como referência as propriedades de um granito conhecido como “Granito do Porto”, uma vez que pode ser encontrado com frequência na região do Porto, com o grau de alteração conhecido, podem-se estimar as características e os parâmetros geomecânicos pela Tabela 4.1 e Tabela 4.2, apresentadas numa comunicação do 8º Congresso de Geotecnia (Topa-Gomes et al. 2002). A partir destes parâmetros geomecânicos podem-se obter os parâmetros de resistência necessários na definição do material, com o auxílio do programa RockLab da Rocscience Inc.

Tabela 4.1 - Características das classes geomecânicas (Topa-Gomes et al. 2002)

Grupo Geomecânico	Grau de alteração (W)	Grau de fracturação (F)	GSI	N <sub>SPT</sub>
G1	W1	F1-F2	65-85	-
G2	W2	F2-F3	45-65	-
G3	W3	F3-F4	30-45	-
G4	W4	F4-F5	15-30	-
G5	W5	n.a.	-	> 50
G6	W5/W6	n.a.	n.a.	< 50
G7	n.a.	n.a.	n.a.	var.

n.a. - não aplicável

Tabela 4.2 - Parâmetros geomecânicos do maciço rochoso (Topa-Gomes et al. 2002)

Grupo Geomecânico	C0 (MPa)	γ (kN/m <sup>3</sup> )	mb	s	Ed (GPa)
G1	90-150	25-27	7.45	6.9E-2	35.0
G2	30-90	25-27	3.2	7.5E-3	10.7
G3	10-35	23-25	0.98	7.5E-4	1.0
G4	1-15	22-24	0.67	0	0.4

C0 - resistência à compressão uniaxial; γ - peso volúmico; mb e s - parâmetros do modelo de Hoek & Brown; Ed - módulo de deformabilidade

Considerando um granito W3, pela entrada na Tabela 4.1, sabe-se que pertence ao grupo geomecânico G3, com GSI entre 30 e 40. Entrando com a informação do grupo geomecânico na Tabela 4.2, estima-se o parâmetro de resistência à compressão uniaxial entre 10 e 35 MPa. Considerou-se então um GSI com o valor de 30 e uma resistência à compressão uniaxial de 35MPa, como valores dos parâmetros para dar entrada no programa RockLab.



Na classificação de Hoek-Brown, utilizada pelo programa, é ainda necessário atribuir um valor para  $M_i$  e outro para o factor de perturbação. O valor de  $M_i$  é dado em função do tipo classificação geológica do maciço, pelo que para um granito, o valor se situa próximo de 32, pela informação fornecida pelo programa, como se pode observar na Fig. 4.1. O factor de perturbação depende da intervenção a que o maciço vai estar sujeito e do tipo de escavação utilizada, o que pelo quadro fornecido pelo programa, para a execução de um túnel com recurso a tuneladora, se obtém um valor nulo para esse factor, como de pode observar pela Fig. 4.2

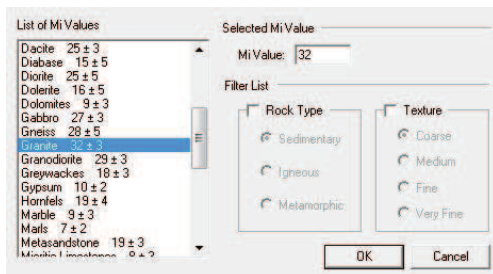


Fig. 4.1 - Lista de valores de  $M_i$ , fornecidos pelo RockLab

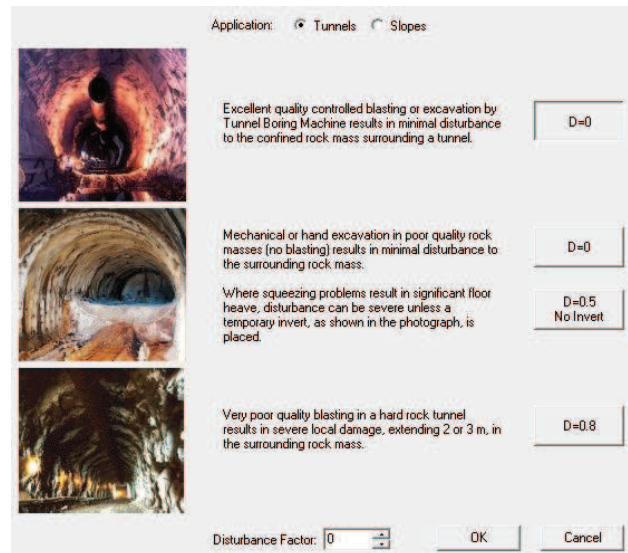


Fig. 4.2 - Quadro para determinação do factor de perturbação, fornecido pelo RockLab

Introduzidos as 4 variáveis descritas atrás, foram obtidos os resultados para os parâmetros de Mohr-Coulomb e de resistência, conforme os indicados pela Fig. 4.3.

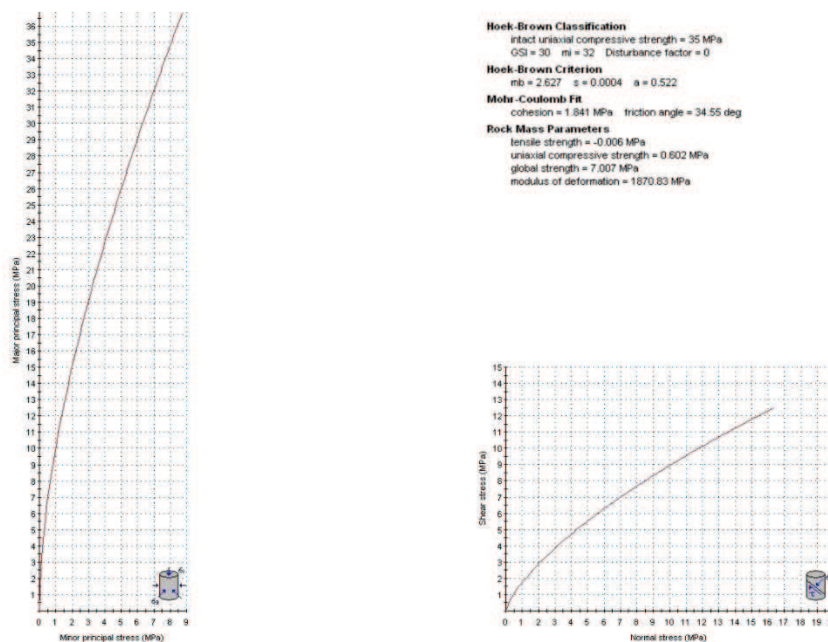


Fig. 4.3 - Análise de resistência da rocha efectuada pelo RockLab

### 4.3 Solução de Kirsch

Estando na presença de um maciço rochoso, cujo estado de tensão que esse maciço está a experimentar seja inferior ao seu limite elástico, cerca de metade da sua resistência à compressão e em que as discontinuidades presentes estejam largamente espaçadas e se encontrem fortemente comprimidas ou seladas, é aceitável considerar uma abertura como sendo um orifício de secção transversal constante executado num volume infinito. Este cenário é equivalente ao estado plano de deformação de uma abertura numa placa, podendo ser utilizada a solução do problema de um orifício circular numa placa de um material linear elástico, homogéneo, isotrópico, contínuo e carregada biaxialmente, ou seja, a solução de *Kirsch*.

Definindo a problemática atrás apresentada, um ponto localizado com as coordenadas polares  $r, \theta$  perto de uma abertura de raio  $a$ , tem como tensões  $\sigma_r$  (radial),  $\sigma_\theta$  (tangencial) e  $\tau_{r\theta}$  (de corte), em que  $\sigma_r$  é a tensão na direcção da variação de  $r$  e  $\sigma_\theta$  é a tensão na direcção da variação de  $\theta$ . As tensões apresentadas são obtidas pelas equações seguintes.

$$\sigma_r = \frac{p_1 + p_2}{2} \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{p_1 - p_2}{2} \left( 1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (4.1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_1 + p_2}{2} \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{p_1 - p_2}{2} \left( 1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (4.2)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{p_1 - p_2}{2} \left( 1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \quad (4.3)$$

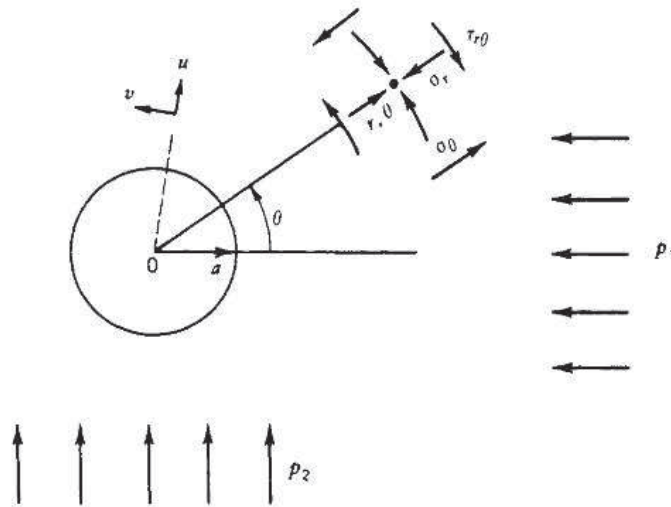


Fig. 4.4 - Representação das variáveis da solução de *Kirsch* (Goodman 1989)

Ao substituir o valor de  $r$  por um valor igual a  $a$ , a dimensão do raio da abertura, nas equações supracitadas, é obtida a variação de tensões nas paredes da abertura. As tensões, radial e de corte são nulas uma vez que se trata de uma superfície livre. A tensão tangencial,  $\sigma_\theta$ , varia desde um máximo de  $3p_1 - p_2$  para  $\theta = 90^\circ$ , até um mínimo de  $3p_2 - p_1$  para  $\theta = 0^\circ$ . Ao distanciar-se da abertura, as concentrações de tensões decrescem muito rapidamente, como se pode verificar tal tendência na Fig. 4.5.

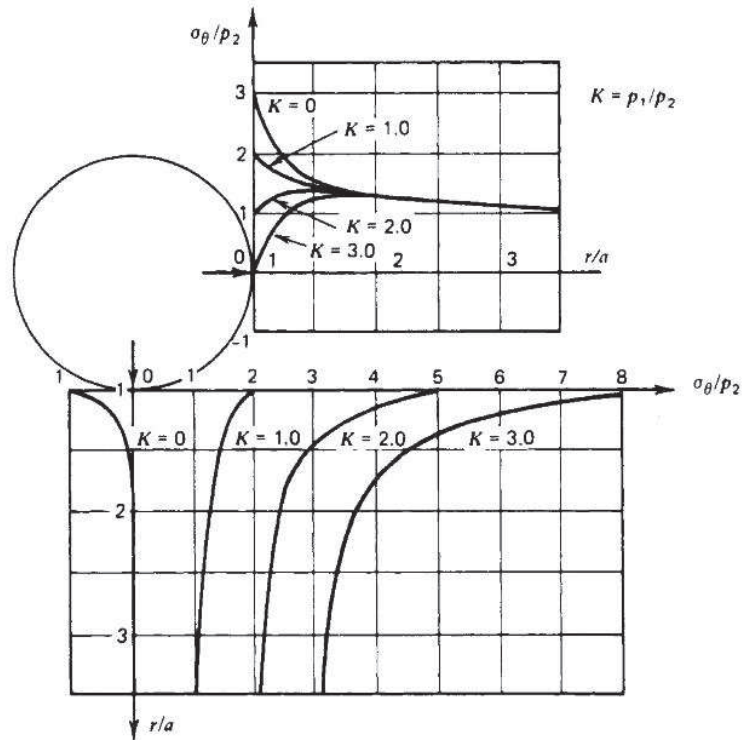


Fig. 4.5 - Concentração de tensões nas imediações da abertura para a solução de *Kirsch* (Goodman 1989)

Um método efectivo para a monitorização de uma abertura subterrânea, é a medição de deslocamentos relativos de pontos nas paredes da abertura com recurso a variados métodos, como por exemplo com recurso a varas ancoradas a diferentes profundidades num furo de sondagem (extensómetro multiposicional). Para interpretar os dados recolhidos, é útil conhecer a ordem de grandeza dos deslocamentos associados com comportamento elástico, podendo estes deslocamentos serem obtidos a partir da solução de *Kirsch*, assumindo condições do estado plano de deformação, pelas equações abaixo apresentadas. Onde  $u_r$  é o deslocamento radial exterior,  $u_\theta$  é o deslocamento tangencial,  $G$  é o módulo de distorção do maciço e  $\nu$  é coeficiente de *Poisson*.

$$u_r = \frac{p_1 + p_2 a^2}{4G} \frac{a^2}{r} + \frac{p_1 - p_2 a^2}{4G} \frac{a^2}{r} \left[ 4(1 - \nu) - \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta \right] \quad (4.4)$$

$$u_\theta = -\frac{p_1 - p_2 a^2}{4G} \frac{a^2}{r} \left[ 2(1 - \nu) + \frac{a^2}{r^2} \sin 2\theta \right] \quad (4.5)$$

É de notar que o efeito da gravidade não se encontra completamente representado nas equações atrás referidas. A gravidade cria um efeito de tensão vertical, representada por  $p_1$  ou  $p_2$ , mas também exerce uma força seguidora na rocha solta perto da superfície superior da abertura, uma força que se exerce sobre a rocha não importando onde a mesma se possa mover.

## 4.4 Modelação do problema no programa Phase<sup>2</sup>

### 4.4.1 Apresentação do programa

O programa Phase<sup>2</sup> é um programa da Rocscience Inc. (Fig. 4.6), baseado no método dos elementos finitos (MEF), para análise de tensões e deformações no solo. Este programa permite uma análise a duas dimensões, podendo os cálculos ser efectuados considerando o estado plano de deformação ou o modelo axissimétrico. Permite ainda uma construção faseada e a introdução de diversos elementos e tipos de suporte durante a simulação.

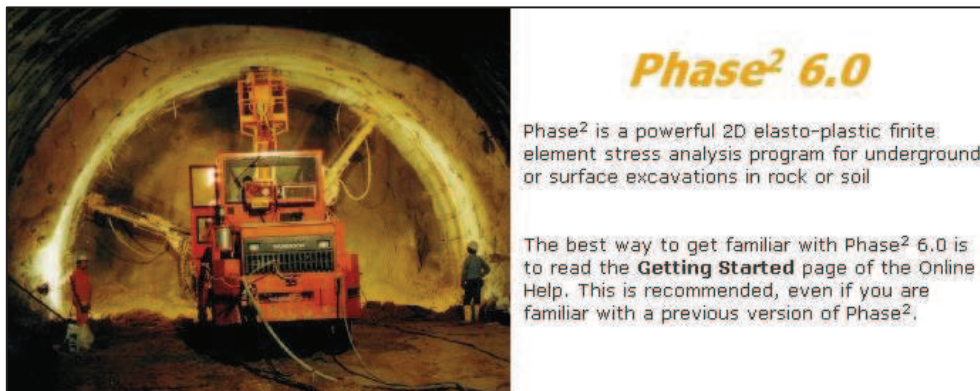


Fig. 4.6 - Imagem de apresentação do programa Phase<sup>2</sup> da Rocscience Inc.

Num primeiro passo, é definida a geometria dos limites de fronteira exterior com recurso a coordenadas no plano x-y. Seguidamente é discretizada a malha de elemento finitos, que pode ser realizada de modo automático, podendo esta ser mais ou menos refinada nos locais assim pretendidos. A malha gerada pode ser composta por elementos triangulares ou quadrangulares, sendo escolhida para a simulação uma malha com elementos triangulares de 3 nós. Definida a discretização e gerada a malha, são atribuídos os tipos de apoios a aplicar a cada extremidade da fronteira.

Na definição dos materiais é permitida a escolha do critério de cedência. De entre os critérios disponíveis o escolhido foi o de Mohr-Coulomb. É na atribuição dos materiais às zonas pretendidas do modelo, que se pode optar por um material previamente definido ou por uma escavação.

O programa permite ainda a escolha do tipo de estado de tensão, dando a opção de um campo de forças gravítico ou de um estado de tensão constante, definido pelo utilizador, com a introdução do valor de cada uma das componentes de tensão.

Definido todo o modelo no módulo "Model" do programa, são gerados ficheiros com as informações decorrentes do cálculo, aquando do accionamento da função "Compute". O comando "Interpret" irá permitir a visualização e interpretação dos resultados obtidos de uma forma gráfica, a partir dos ficheiros gerados durante o cálculo.

### 4.4.2 Modelação do problema no estado plano de deformação

Tendo em consideração os requisitos geométricos em relação à geometria do modelo, uma vez que para além do limite exterior da abertura teria de ser considerada uma distância de pelo menos 30 m até à fronteira e que a abertura circular possui um diâmetro de 3000 mm, foi definida uma geometria externa quadrangular com 63 metros de lado (30m + 3m + 30m).

Sendo assim, os vértices da fronteira externa possuem as seguintes coordenadas: (0.00, 0.00), (63.00, 0.00), (0.00, -63.00) e (63.00, -63.00). No centro da geometria assim definida, foi criada uma fronteira de escavação circular, de raio 1,5 metros, correspondente à geometria da abertura do tubo de betão considerado. O centro da fronteira de escavação possui as coordenadas (31.50, -31.50). O conjunto das fronteiras definidas pode ser observado na Fig. 4.7.

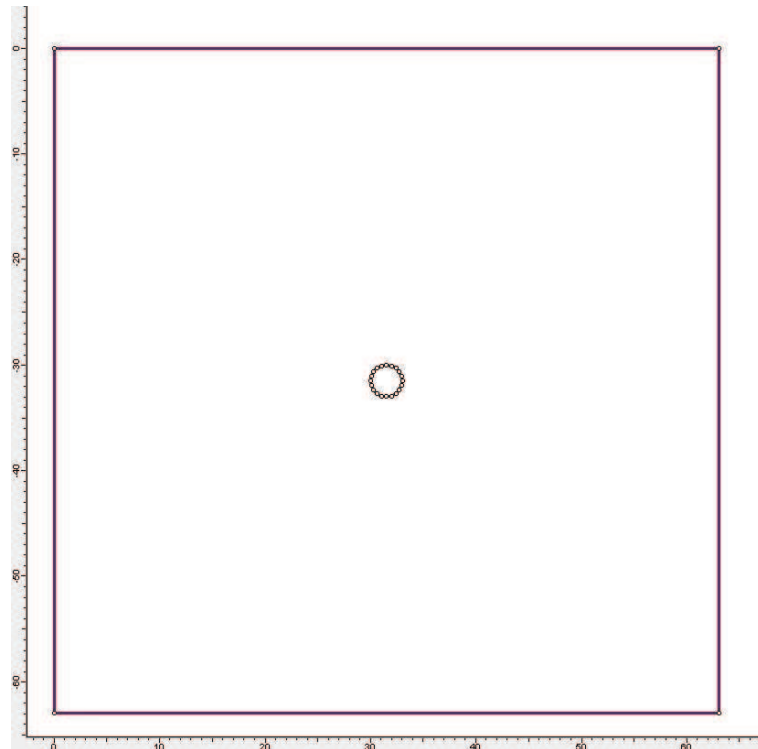


Fig. 4.7 - Definição das fronteiras, externas e de escavação, do modelo

Antes da geração malha de elementos finitos a aplicar à geometria elaborada, é necessário criar o material que irá compor o solo a atribuir ao maciço. Introduzindo os valores das propriedades elásticas e dos parâmetros de resistência, foi criado um material ao qual foi atribuído o nome de “Solo”. Uma vez que o estado de tensão a que o maciço está sujeito é um estado de tensão induzido, é necessário definir que apenas são consideradas forças externas sem o efeito da gravidade, escolhendo a opção “Field Stress Only” nas propriedades do material para o carregamento inicial do elemento. Nesta primeira fase da análise apenas vai ser considerado o comportamento elástico do material, pelo que será uma opção a assinalar nas suas propriedades. A caixa de introdução das propriedades do material definido pode ser observada na Fig. 4.8.

Definido o material, é necessário atribuí-lo às secções do modelo que vão ser compostas por esse material. A modelação presente vai ser efectuada com duas etapas de cálculo, sendo a primeira composta pela introdução do estado de tensão ao terreno e a segunda pela escavação na zona da abertura do túnel. Como tal, na primeira etapa é atribuído o material “Solo” a toda o maciço representado e na segunda etapa, é retirado esse material do interior da fronteira de escavação, diferença que pode ser observada da Fig. 4.9 para a Fig. 4.10.



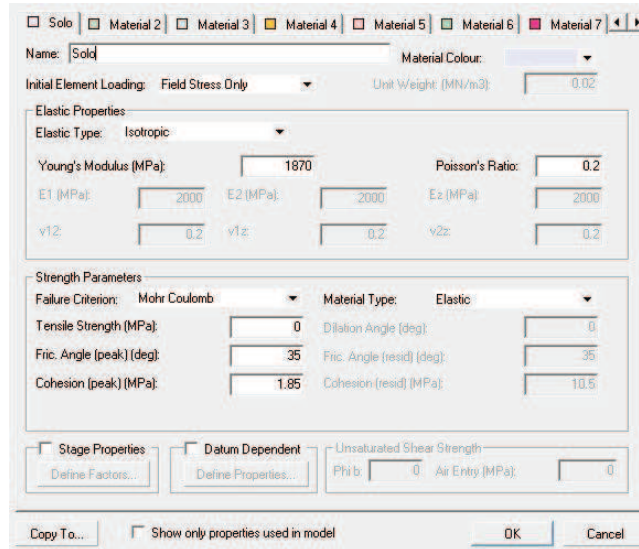


Fig. 4.8 - Propriedades elásticas do material “Solo”, a atribuir ao maciço

O próximo passo passa pela discretização e geração da malha de elementos finitos, discretização esta que é efectuada de modo automático pelo programa, podendo ser refinada posteriormente. Optou-se por uma discretização que desse preferência a uma malha mais refinada nas imediações da escavação e que fosse mais espaçada junto da fronteira exterior, para que o cálculo não fosse sobrecarregado nas zonas em que as alterações verificadas não são tão significativas. Como tal obteve-se a malha representada na Fig. 4.9.

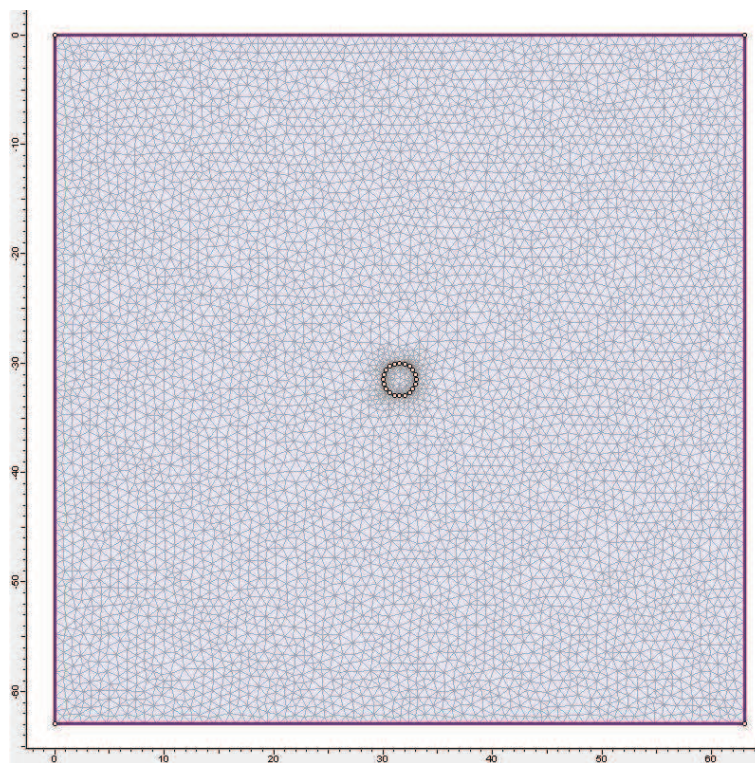


Fig. 4.9 - Malha gerada e solo atribuído à geometria da etapa 1



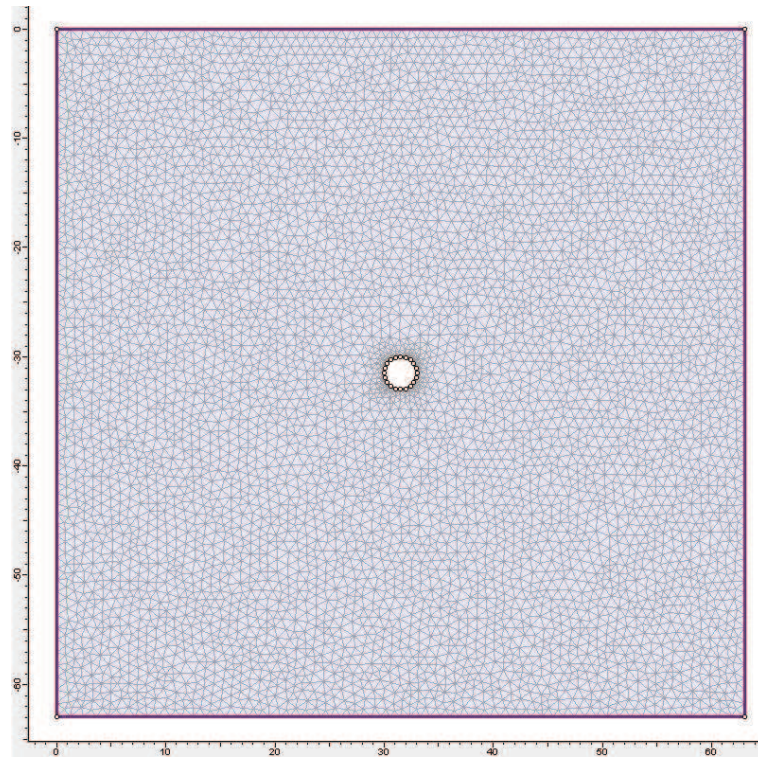


Fig. 4.10 - Malha gerada, solo e escavação atribuídos à geometria da etapa 2

Definida a malha de elementos finitos do modelo, é necessário definir as restrições de movimentos a impor ao terreno. Uma vez que o estado de tensão inicial do maciço vai ser introduzido através de duas cargas distribuídas, uma ao longo da extremidade superior e outra ao longo da extremidade direita do terreno, é necessário impedir os movimentos nas outras duas extremidades não carregadas. Sendo assim, foram aplicados apoios que apenas impedem deslocamentos em “y”, em toda a extensão da fronteira inferior e foram colocados apoios que impedem deslocamentos em “x”, na totalidade da extensão da fronteira esquerda, ficando por isso, o nó inferior esquerdo impedido de se deslocar tanto na direcção vertical como na direcção horizontal, sendo-lhe atribuído um apoio duplo.

Como já foi referido, o estado de tensão inicial será introduzido por meio de carregamentos distribuídos ao longo de duas extremidades da fronteira, podendo-se atribuir os valores desejados a cada carregamento de cada uma das duas direcções do plano. A Fig. 4.11, apresenta o modelo completo da primeira etapa do cálculo, com os apoios definidos e para um carregamento de  $1 \text{ MN/m}^2$  para cada direcção.

No seguimento da modelação e dos cálculos a efectuar, foram modificados os valores dos carregamentos aplicados de acordo com o pretendido, para efectuar a análise comparativa com a solução teórica, tendo-se mantido toda a estrutura e propriedades do modelo definido tal como descrito.

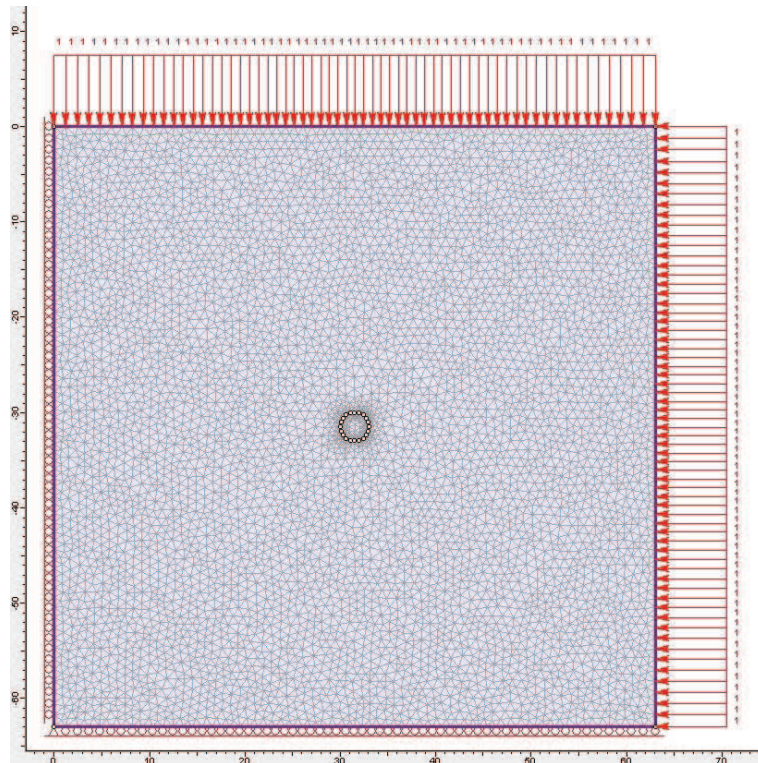


Fig. 4.11 - Modelo completo (EPD) para a etapa 1, com malha de elementos finitos, condições de apoio e carregamento inicial

#### 4.4.3 Modelação do problema com o tipo de análise axissimétrica

Neste ponto da análise, o túnel será modelado com recurso às propriedades de modelação axissimétricas oferecidas pelo programa. Como foi referido previamente, irá ser simulada uma situação em 3 dimensões, com recurso a esta propriedade, na qual todo o modelo será desenvolvido em torno do eixo de revolução do túnel, que será definido no sentido de desenvolvimento da sua execução. Este eixo que no modelo axissimétrico corresponde ao eixo das coordenadas em “y”, tomando como referência uma figura do modelo do estado plano de deformação, por exemplo a Fig. 4.11, representa um eixo que passa pelo ponto de coordenadas (31.50, -31.50) e é perpendicular ao plano “x,y” representado na figura.

Numa primeira análise será modelado um protótipo com 4 fases de escavação, apenas com as propriedades elásticas do terreno, tal como o modelo do estado plano de deformação, que irá ser comparado com este e também com a solução teórica proposta.

As fases de escavação possuem um comprimento de 2,5m cada, por ser um valor concordante com os valores dos comprimentos correntes de secções de tubos de betão para empurre, existentes no mercado.

Numa segunda fase da análise, mais complexa, já serão consideradas as propriedades plásticas dos materiais, sendo consideradas várias etapas de escavação até se atingir cada secção escavada, correspondente a cada secção de tubo instalada. Será também tido em consideração, a interacção do material do tubo a ser empurrado com o fluido injectado durante a execução para redução do atrito estrutura/solo, durante a fase de empurre.

Nos dois tipos de análise efectuada, com as propriedades elásticas e plásticas, será considerado que a escavação foi realizada com o recurso a uma tuneladora que permite a estabilização da frente, pelo que esta estabilização será modelada por uma força distribuída pela superfície da face da escavação.

#### 4.4.3.1 Definição da geometria do modelo

À semelhança do que foi feito para o modelo do estado plano de deformação, em primeiro lugar é necessário definir as fronteiras externas do modelo. Em concordância com a geometria adoptada no modelo anterior, para um tubo de diâmetro exterior de 3000 mm, será definida a distância em “x” a partir do eixo de simetria com um total de 31,5 m (1,5 m + 30,0 m) e será definida uma distância em “y” de 22,5 m, tendo em conta uma distância razoável do final da escavação até á fronteira do maciço.

Sendo assim, os vértices da fronteira exterior terão as seguintes coordenadas: (0.00, 0.00), (31.50, 0.00), (0.00, -22.50) e (31.50, -22.50), formando assim a fronteira exterior que se encontra representada na Fig. 4.12.

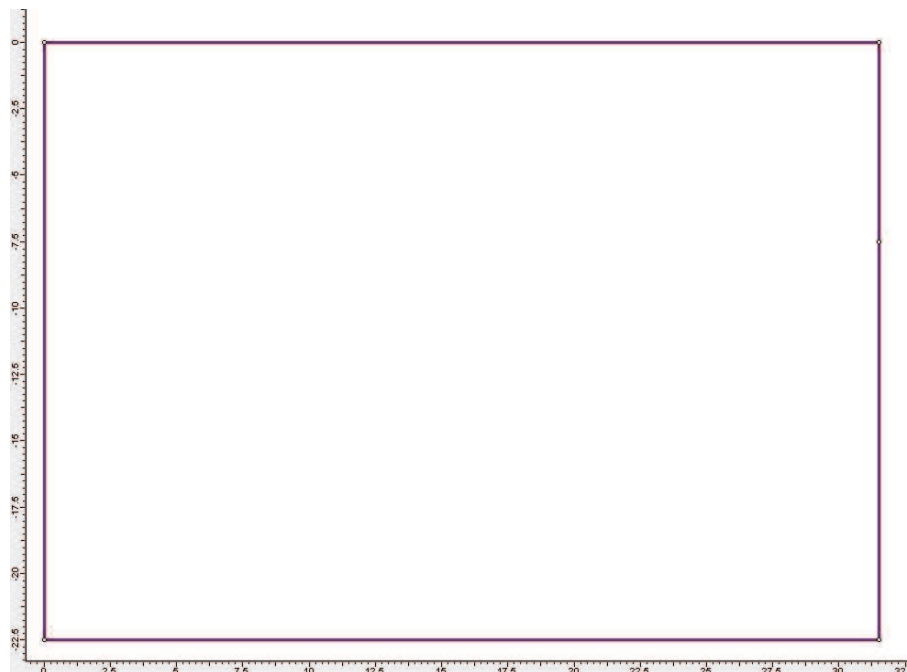


Fig. 4.12 - Definição da fronteira externa para o modelo axissimétrico

Para a definição das fronteiras de escavação, terá que ser tido em conta o faseamento construtivo a adoptar, o que fará com que as fronteiras sejam diferentes do modelo em que apenas será considerado o cálculo elástico para o modelo em que será considerado o cálculo plástico.

No modelo em que será realizado o cálculo elástico, tal como foi referido, cada fase de escavação terá um comprimento unitário de 2,5 m, considerando a escavação de 4 secções, ter-se-á um comprimento total de 10 metros de escavação, dividida por 4 etapas de escavação. Tendo em conta as condições atrás referidas, será necessário considerar para limites de escavação um segmento de recta paralelo ao eixo dos “yy” com comprimento de 10 m, com início no ponto de coordenadas (1.50, 0.00) e fim no ponto (1.50, -10.00) e 4 segmentos de recta paralelos ao eixo dos “xx”, tendo o primeiro início no ponto (0.00, -2.50) e fim no ponto (1.50, -2.50), sendo os outros 3 restantes, paralelos a este e cada um

colocado com um afastamento de 2,5 m entre si, no sentido de progressão das ordenadas negativas. O resultado da definição das fronteiras de escavação, para este caso, pode ser observado na Fig. 4.13.

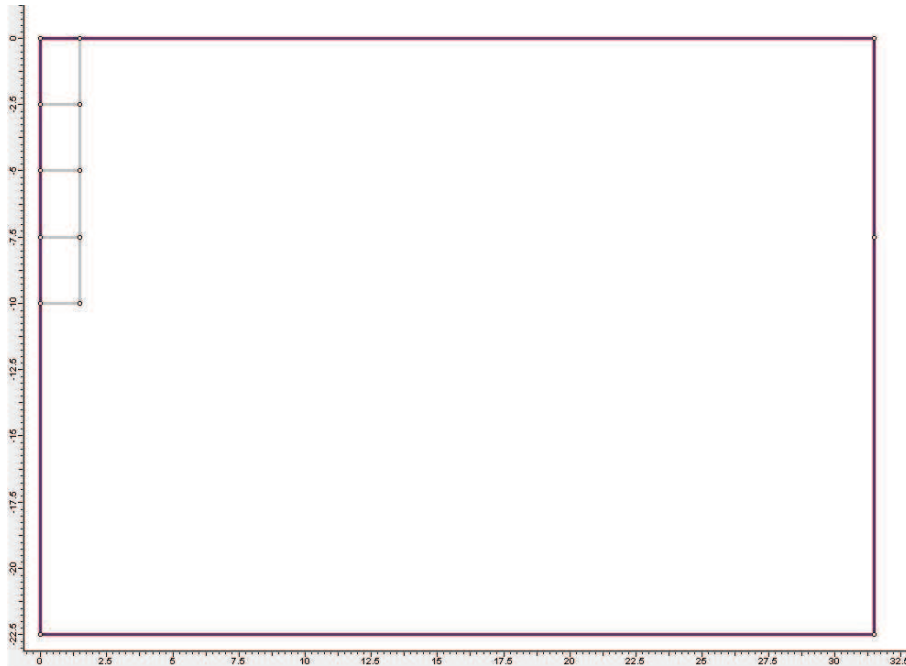


Fig. 4.13 - Definição das fronteiras de escavação para o modelo de cálculo elástico

No modelo em que será realizado o cálculo plástico, a definição das fronteiras é um pouco mais complexa. Em termos de fronteira total de escavação a área a definir será igual à área total de escavação do modelo para o cálculo plástico. A diferença reside, no faseamento de escavação, uma vez que cada etapa de escavação terá um comprimento de 0,50 m, em vez dos 2,5 m considerados no modelo anterior. Como tal, as fronteiras paralelas ao eixo dos “xx” serão definidas de modo análogo ao anterior, com a diferença de se considerar um espaçamento entre cada segmento de 0,50 m, o que no total perfaz 20 etapas de escavação, para a totalidade dos 10 m de comprimento escavado.

Uma vez que será necessário definir ainda nesta fase todas as fronteiras de divisão do maciço, serão consideradas duas faixas adjacentes e paralelas à fronteira de escavação, no comprimento total dos 10 m de escavação, com uma largura em “x” de 0,30 m cada uma e igualmente divididas por segmentos paralelos ao eixo dos “xx” espaçados de 0,50 m, correspondentes às etapas de escavação. Estas faixas servirão para a modelação da espessura do tubo de betão e para a modelação de um fluido injectado entre o betão e o maciço, de forma a reduzir o atrito na fase de execução e de empurre.

Considerando todas as características das fronteiras, descritas atrás, obteve-se o resultado que pode ser observado na Fig. 4.14.

Em termos de condições de apoio, todo o modelo axissimétrico possuirá as mesmas restrições em termos de movimentos. O estado de tensão inicial neste caso, tal como no modelo do estado plano de deformação será constante, sem intervenção de forças gravíticas e induzido por carregamentos distribuídos aplicados nas fronteiras do maciço. O modelo possuirá apoios que apenas impedem movimentos em “x” na fronteira esquerda e apoios que apenas impedem movimentos em “y” na fronteira inferior, possuindo o ponto (0.00, -22.50) um apoio duplo, que impede os seus movimentos nas duas direcções.



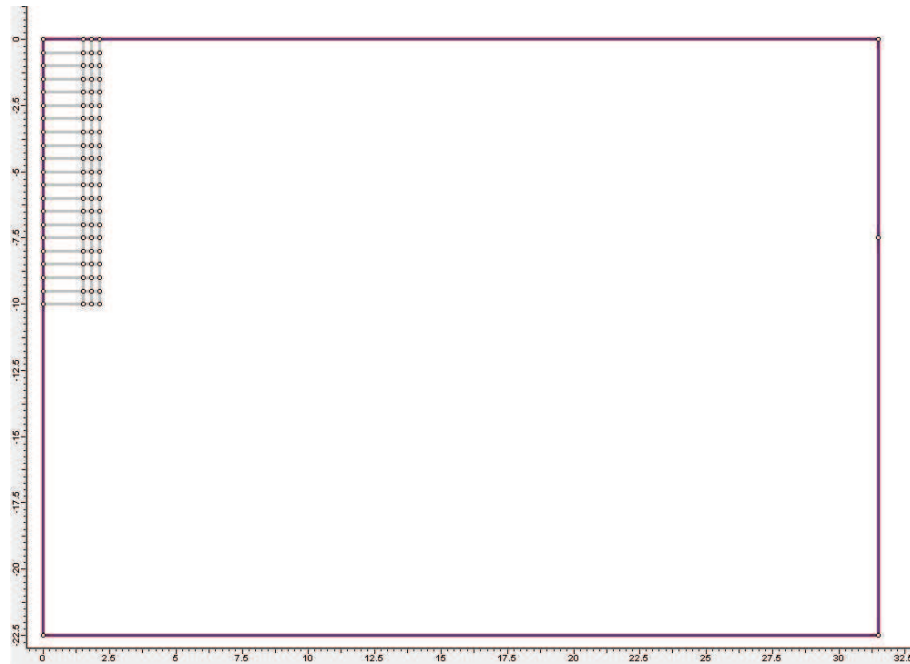


Fig. 4.14 - Definição das fronteiras de escavação e de divisão por materiais para o modelo de cálculo plástico

Para a discretização da malha de elementos finitos, será tido em conta o critério em que será utilizada uma malha mais refinada na zona da escavação, aumentando progressivamente o seu espaçamento para as zonas próximas das fronteiras mais afastadas. Este critério permite obter uma maior definição nos cálculos na zona em que se desenrola o processo construtivo, ou seja, nos locais onde existe uma maior variação de tensões e deslocamentos durante a execução.

No modelo em que é efectuado o cálculo plástico, uma vez que a distribuição das fronteiras de escavação e de divisão por materiais é mais complexa, a malha de elementos finitos será mais refinada comparativamente com a malha do modelo em que é efectuado o cálculo elástico, junto à concentração dessas fronteiras.

A distribuição da malha de elementos finitos para o modelo em que é efectuado o cálculo elástico e para o modelo em que é efectuado o cálculo plástico pode ser observada nas Fig. 4.15 e Fig. 4.16, respectivamente. Na Fig. 4.17, pode ser observado em pormenor, a discretização mais refinada da malha na zona da escavação.

Em relação à definição do estado de tensão inicial do maciço, tal como foi feito no modelo do estado plano de deformação, de modo a instalar um estado de tensão constante de 1MPa, será aplicada uma carga distribuída de 1MN/m nas fronteiras esquerda e superior do modelo. Uma vez que se está a utilizar um modelo axissimétrico, implica que a carga aplicada na fronteira possua o eixo de revolução coincidente com o eixo dos “yy”, o que significa que a carga é aplicada em torno deste eixo, nos 360° de revolução, pelo que é impossível variar a relação entre a tensão vertical e a tensão horizontal (k), facto que é conseguido na modelação no estado plano de deformação.

Nas Fig. 4.15 e Fig. 4.16, podem-se observar os modelos completos, na etapa inicial, para a situação do cálculo elástico e do cálculo plástico, respectivamente, onde em ambos foi aplicado o material “Solo” a todo o maciço, cujas propriedades foram definidas como as da Fig. 4.8, para o modelo elástico. Para o modelo plástico, na definição das propriedades do material “Solo”, foram considerados

os valores residuais iguais ao de pico e um ângulo de dilatação nulo, como se pode observar na Fig. 4.18.

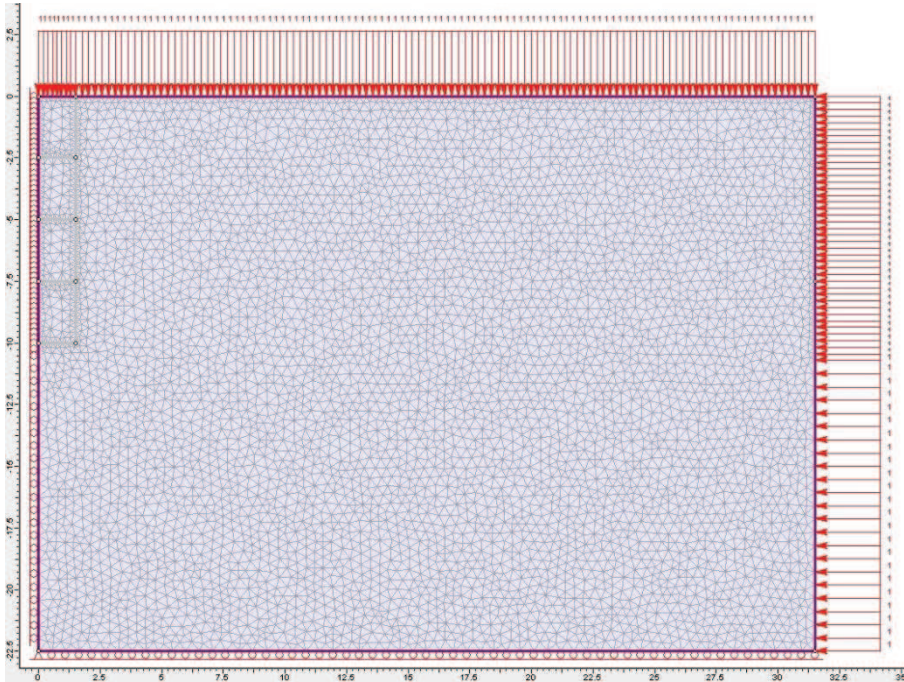


Fig. 4.15 - Modelo axissimétrico completo para a etapa 1 e para a situação de cálculo elástico

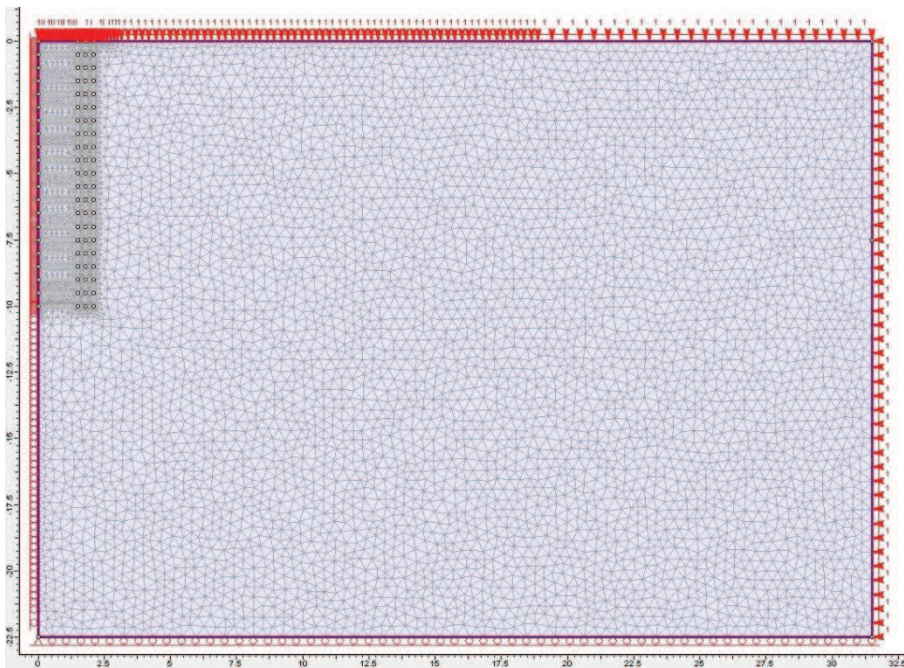


Fig. 4.16 - Modelo axissimétrico completo para a etapa 1 e para a situação de cálculo plástico



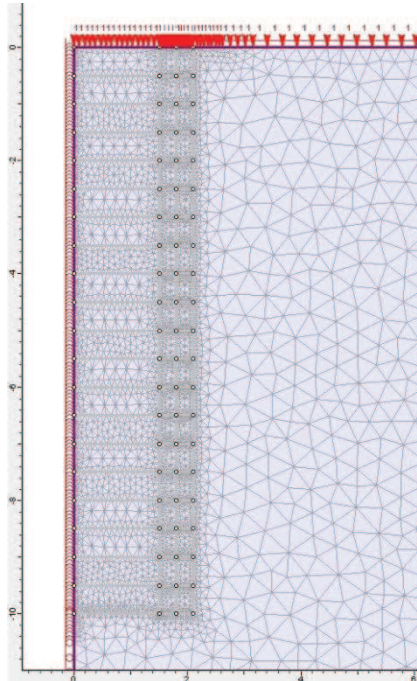


Fig. 4.17 - Pormenor da discretização da malha na zona de escavação para o modelo de análise plástica

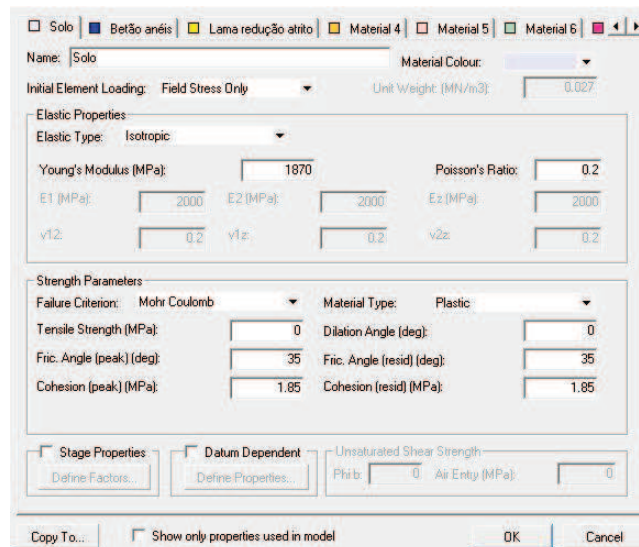


Fig. 4.18 - Propriedades plásticas do material "Solo", a atribuir ao maciço

Para a caracterização dos outros materiais a aplicar no modelo de cálculo plástico, é necessário definir e introduzir no programa os parâmetros que os caracterizam em termos de resistência. Os anéis de betão a introduzir no curso do túnel são modelados pelo material "Betão anéis" criado de um modo análogo ao do material "Solo". Em termos de parâmetros de caracterização mecânica, foi assumido um betão da classe de resistência C50/60, pelo que o seu valor característico de tensão de rotura à compressão ( $f_{ck}$ ) é de 50MPa e o seu módulo de elasticidade (E) possui um valor de 37GPa. Para a definição dos parâmetros a introduzir no programa, foi introduzido o respectivo módulo de

elasticidade, tendo-se assumido o valor de 0,2 para o coeficiente de Poisson, um ângulo de atrito nulo e uma coesão igual a metade do valor de  $f_{ck}$ , ou seja, 25MPa. Os dados introduzidos podem ser verificado na Fig. 4.19.

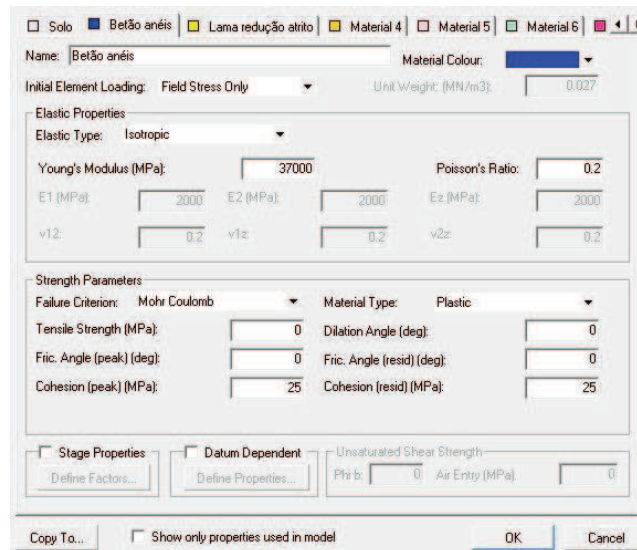


Fig. 4.19 - Propriedades plásticas do material “Betão anéis”, a atribuir aos tubos de betão

O fluido introduzido entre o tubo de betão e o maciço terá de funcionar como uma espécie de uma lama bentonítica injectada nesse espaço, aquando da execução. Sendo assim, visto não se possuir valores comerciais para a definição dos seus parâmetros de resistência, foram obtidos por redução dos parâmetros do material “Solo” aplicado ao maciço. Como tal, foi assumido um coeficiente de Poisson igual, um módulo de Young e um ângulo de atrito 3 vezes menores e um valor para a coesão da ordem dos 200kPa. O módulo de Young adoptado foi de 625MPa e o ângulo de atrito de 12°, como se pode observar na Fig. 4.20.

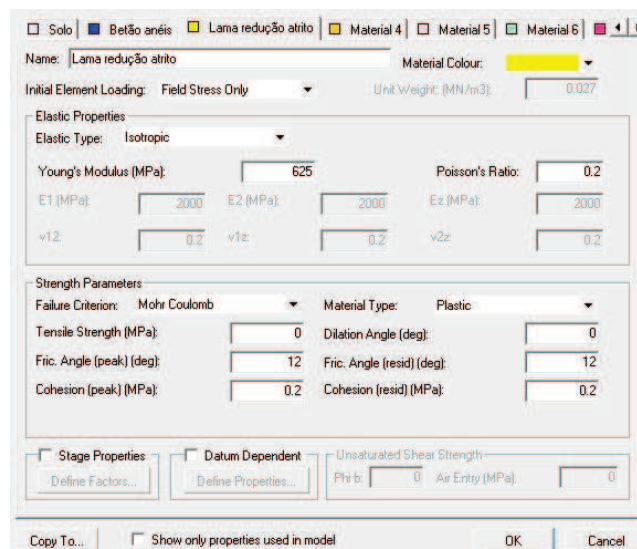


Fig. 4.20 - Propriedades plásticas do material “Lama redução atrito”, a atribuir ao fluido de redução de atrito estrutura/macico

#### 4.4.3.2 Faseamento construtivo para o modelo de cálculo elástico

Definida toda a geometria do modelo, quer em termos de fronteiras exteriores, quer em termos de fronteiras interiores, é necessário definir o modo como se vai desenrolar o cálculo e as etapas que este vai seguir.

O modelo para o cálculo elástico, irá desdobrar-se em 5 etapas de cálculo, tendo em consideração que foram definidas 4 secções a ser escavadas.

Numa etapa inicial, como a definida na Fig. 4.15, é aplicado o estado de tensão inicial ao maciço representado. Nas 4 etapas seguintes será escavada uma secção de 2,5m por cada etapa, começando pela secção mais próxima da fronteira superior, prosseguindo com a escavação da secção imediatamente adjacente, na próxima etapa de cálculo. Nestas últimas 4 etapas, que correspondem à escavação, será aplicada uma força distribuída pela face de escavação com o valor de 0,9MN/m no sentido da progressão da escavação, de modo a simular a pressão da estabilização da frente aplicada pela tuneladora. A Fig. 4.21, apresenta o pormenor da zona de escavação em cada uma das últimas 4 etapas.

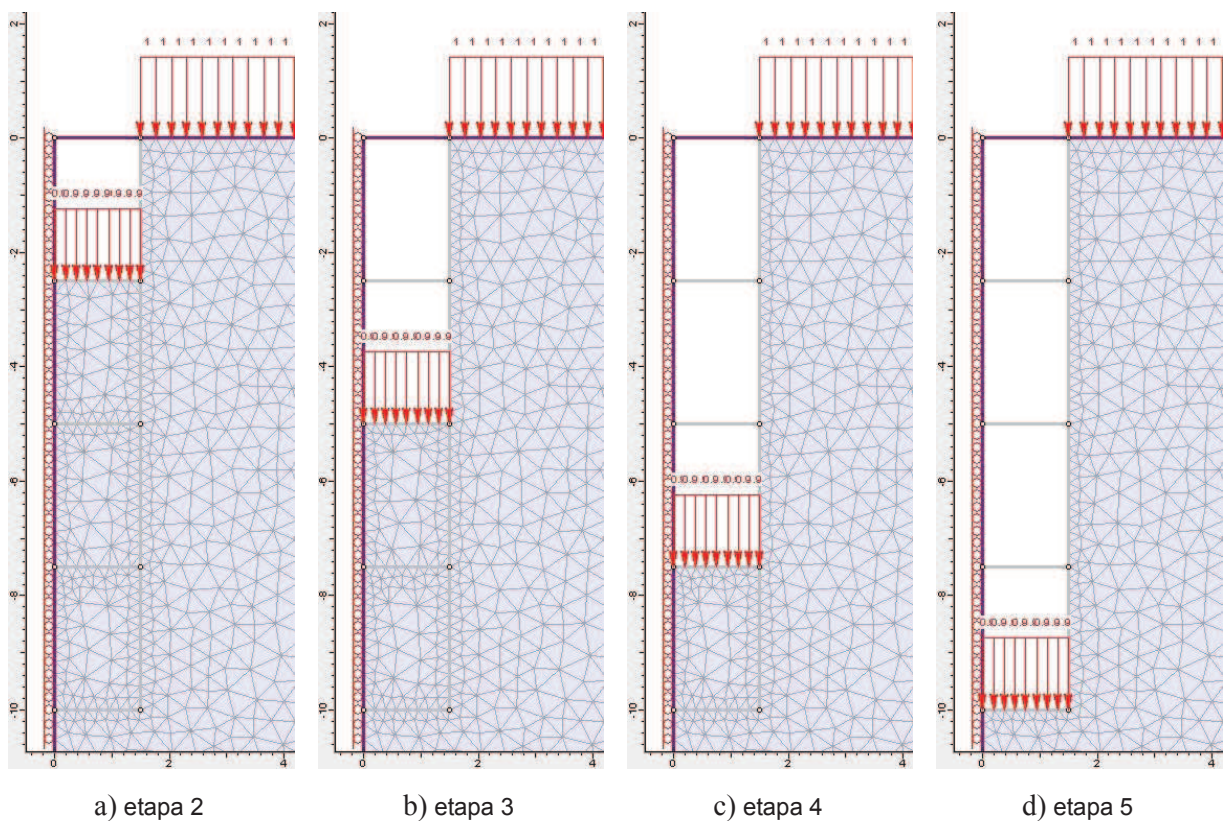


Fig. 4.21 - Evolução da zona de escavação para o modelo elástico

#### 4.4.3.3 Faseamento construtivo para o modelo de cálculo plástico

A complexidade da divisão do modelo de cálculo plástico, num maior número de zonas discretas do que as consideradas no modelo de cálculo elástico, resulta não só da incorporação de dois novos materiais no modelo, mas também da redução do comprimento de secção escavada por etapa. Como já foi referido, será modelada uma escavação de 0,5m por etapa, o que comparativamente com o modelo

anterior, para a escavação de uma secção completa de 2,5m, terão de ser executadas neste modelo 5 etapas.

No processo construtivo neste modelo a escavação não será executada de um modo directo de etapa para etapa, visto que tem que se ter em conta a introdução de um suporte e de um fluido para redução do atrito, que neste caso será o tubo de betão e uma espécie de uma lama bentonítica, respectivamente.

A execução de um túnel com a técnica de *pipe jacking*, implica que exista um escudo junto da frente de escavação, quer se trate de uma escavação por meio de uma tuneladora ou por um meio com recurso a mão-de-obra. Neste caso específico, foi assumida uma solução construtiva, com recurso a uma tuneladora capaz de controlar a estabilidade da frente, tal como no modelo anterior, com a introdução de uma carga distribuída pela face de escavação de  $0,9\text{MN/m}^2$ , a partir do momento em que é iniciada a escavação. O facto de a escavação ser suportada quase imediatamente após ser executada, uma vez que existe a capacidade de empurre constante do conjunto de suporte ao longo do curso do túnel (secções dos tubos e escudo da tuneladora), será efectuada a escavação de uma etapa, quando esta já se encontra com o suporte aplicado, o que implica que este tenha que ser introduzido na etapa imediatamente anterior. A par da introdução do suporte é introduzido o fluido para a redução do atrito, no espaço a ele destinado, entre a secção do tubo e o maciço adjacente.

Contando com divisão da escavação de um segmento de 2,5m em etapas de 0,5m, com a etapa inicial de aplicação do estado de tensão no maciço e com a introdução do suporte e do fluido para redução do atrito estrutura/solo, serão executadas 11 etapas até se obter o equivalente à primeira secção de tubo totalmente introduzida e com a escavação efectuada. Pelo que foi descrito, considera-se que neste modelo para a introdução de cada secção de tubo de betão no alinhamento do túnel, são modeladas 10 etapas. A evolução da modelação do processo construtivo pode ser observada pela sequência representada na Fig. 4.22, para a introdução de uma secção de um tubo de betão no alinhamento do túnel, com 2,5m de comprimento.

A modelação do empurre dos anéis de betão, é conseguida pela introdução de uma carga distribuída pela espessura da secção do tubo, após a introdução de uma ou de um conjunto de secções de tubo e da escavação total correspondente a essa secção, ou conjunto de secções.



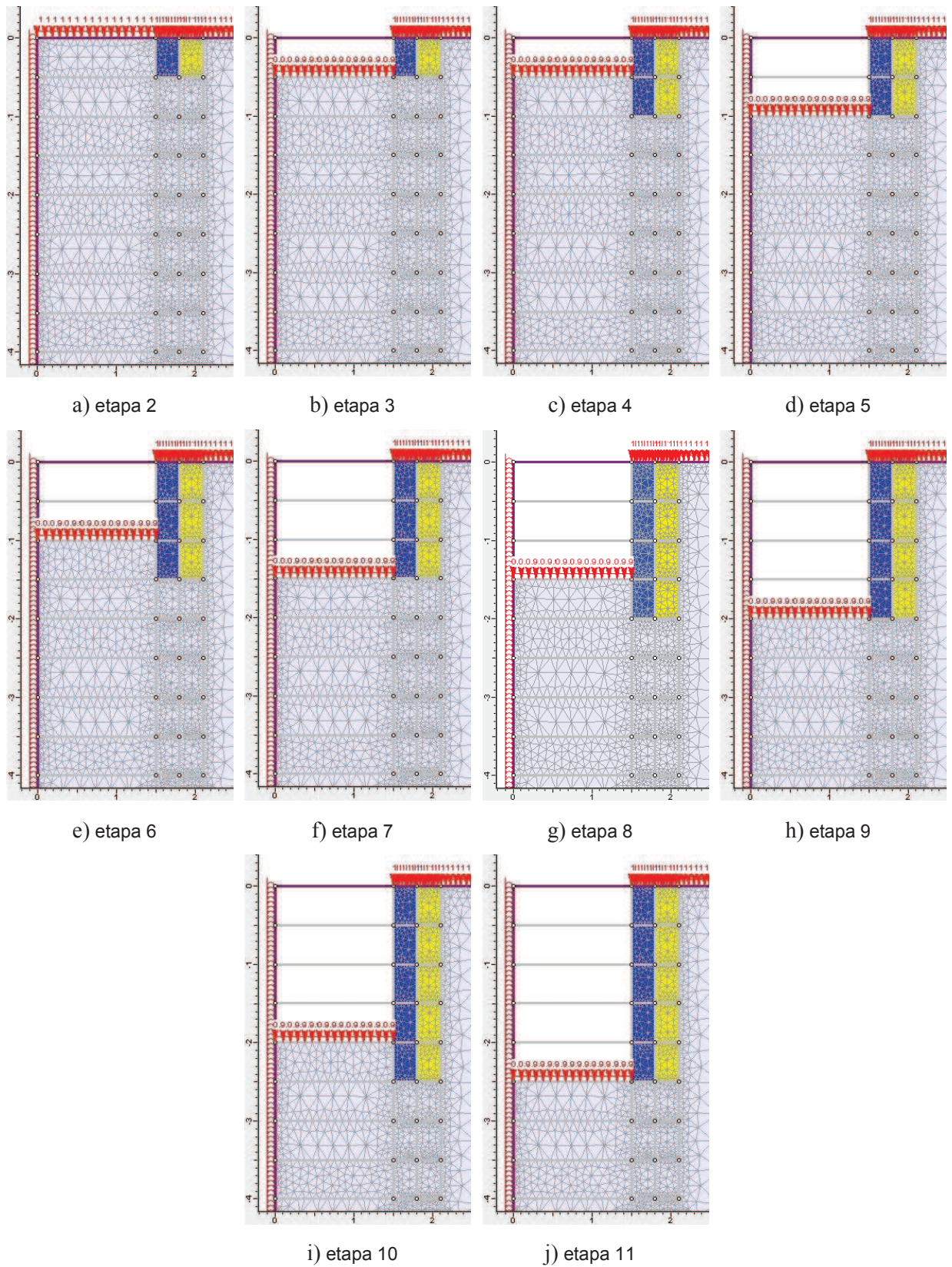


Fig. 4.22 - Evolução da zona de escavação e de introdução do tubo de betão para o modelo plástico





# 5

## ANÁLISE DE RESULTADOS

### 5.1 Resultados obtidos pela solução de *Kirsch*

Como foi referido no capítulo anterior, a solução teórica de *Kirsch*, servirá como meio de aferição do modelo simulado no programa Phase<sup>2</sup>.

Sendo assim, para a obtenção das soluções teóricas comparáveis, os dados utilizados nesta solução foram os mesmos que os utilizados no modelo do estado plano de deformação, quer em termos de propriedades geométricas, quer em termos parâmetros mecânicos dos materiais.

De modo a criar e interpretar resultados de uma forma mais fluída, estes foram obtidos com o recurso a folhas de cálculo para obtenção dos resultados dados pelas equações apresentadas no ponto 4.3.

Uma vez que a geometria do maciço modelado no programa de cálculo, possui as fronteiras à distância de 31,5m do centro da abertura considerada, os valores obtidos para a solução teórica, foram conseguidos pela variação do raio  $r$  desde o valor correspondente ao raio da abertura  $a$ , nas equações respectivas, até ao valor de 31,5m, por incrementos de raio igualmente espaçados. Visto que o foi assumido que o túnel possui uma abertura de 3,0m de diâmetro, em todos os casos, o valor de  $a$  assume o valor de 1,5m.

No que diz respeito ao estado de tensão induzido ao modelo, conseguido pelas cargas  $p_1$  e  $p_2$ , foram obtidos resultados para diferentes relações entre elas. Como essas cargas pretendem simular a tensão horizontal e vertical presente no maciço, respectivamente, os resultados obtidos, foram conseguidos para 5 valores de  $k$  ( $k=0$ ,  $k=1$ ,  $k=2$ ,  $k=3$  e  $k=4$ ), sendo  $k = \frac{p_1}{p_2}$ .

O estado de tensão, representado no modelo de apresentação do estado plano de deformação, corresponde ao estado de tensão para  $k=1$ , tendo sido aplicada uma carga distribuída horizontal e outra vertical, com o valor de  $1\text{MN/m}^2$ , de modo a simular um estado de tensão de  $1\text{MPa}$ .

Nesta solução, para a variação das relações de  $k$ , foi fixado o valor de  $p_2 = 1000\text{ kPa}$ , fazendo variar apenas  $p_1$ .

### 5.1.1 Resultados obtidos para tensões, pela solução de *Kirsch*

As tensões dadas pela solução de *Kirsch*, podem ser de três tipos,  $\sigma_r$  (radial),  $\sigma_\theta$  (tangencial) e  $\tau_{r\theta}$  (de corte), como já foi referido, podendo ser obtidas pelas equações (4.1), (4.2) e (4.3).

Introduzindo as equações numa folha de cálculo, obtiveram-se os resultados de modo automático, tendo sido definido o valor do incremento do raio como  $\Delta r = 0,25m$ , para a obtenção das tensões desde o ponto  $r = 1,5m$  (valor na fronteira da abertura) até ao ponto  $r = 31,5m$  (ponto na fronteira estipulada).

Nesta análise de tensões, foram simuladas as tensões radiais e tangenciais, para duas orientações perpendiculares entre si, uma na direcção horizontal em que  $\theta = 0^\circ$  e outra na direcção vertical em que  $\theta = 90^\circ$ , tomando como referência a Fig. 4.4.

Sendo assim foram obtidos os valores das tensões radiais e tangenciais para estas duas direcções definidas e para os 5 diferentes valores de  $k$ . Seguidamente serão apresentados os gráficos obtidos pela representação das tensões ao longo dos valores atribuídos a  $r$  ao longo de cada uma das duas direcções. Os valores discretos, obtidos para as tensões, são apresentados na secção de Anexos.

#### 5.1.1.1 Tensões radiais e tangenciais nas direcções $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ , para $k=0$

As tensões representadas nos gráficos das Fig. 5.1 e Fig. 5.2, foram obtidas para valores de  $p_1 = 0 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

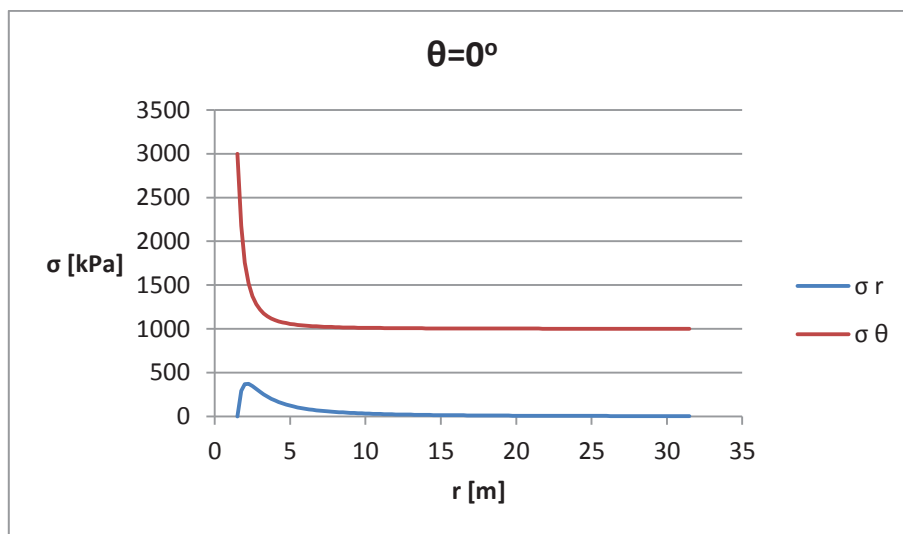


Fig. 5.1 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção horizontal, para  $k=0$  com a solução de *Kirsch*

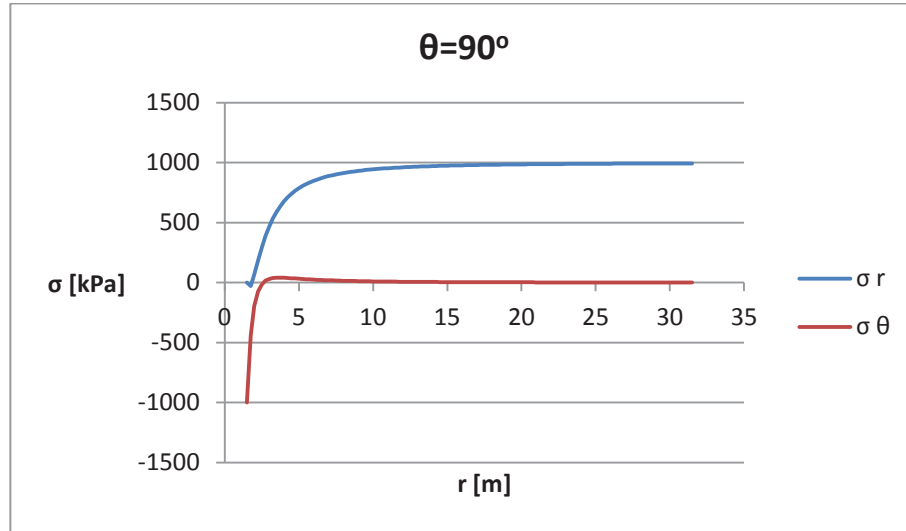


Fig. 5.2 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção vertical, para  $k=0$  com a solução de Kirsch

#### 5.1.1.2 Tensões radiais e tangenciais nas direcções $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ , para $k=1$

As tensões representadas nos gráficos das Fig. 5.3 e Fig. 5.4, foram obtidas para valores de  $p_1 = 1000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

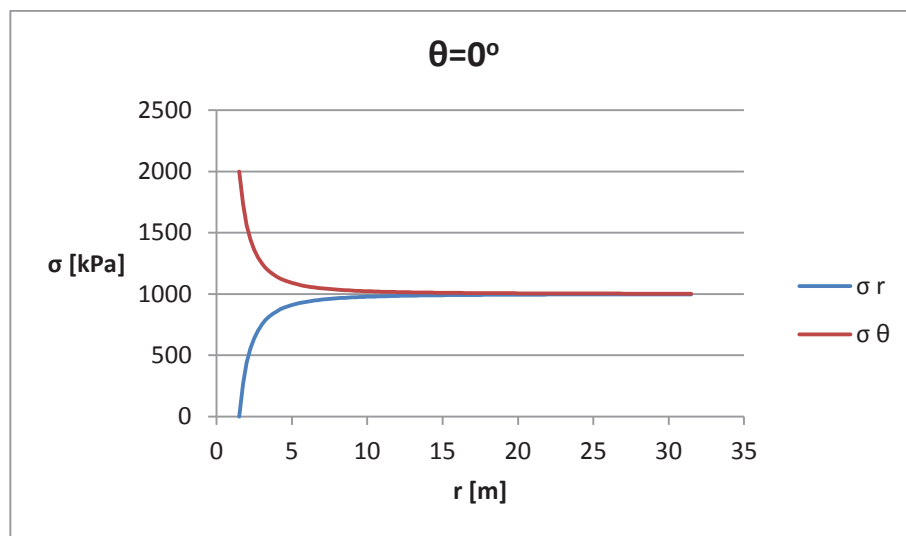


Fig. 5.3 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção horizontal, para  $k=1$  com a solução de Kirsch

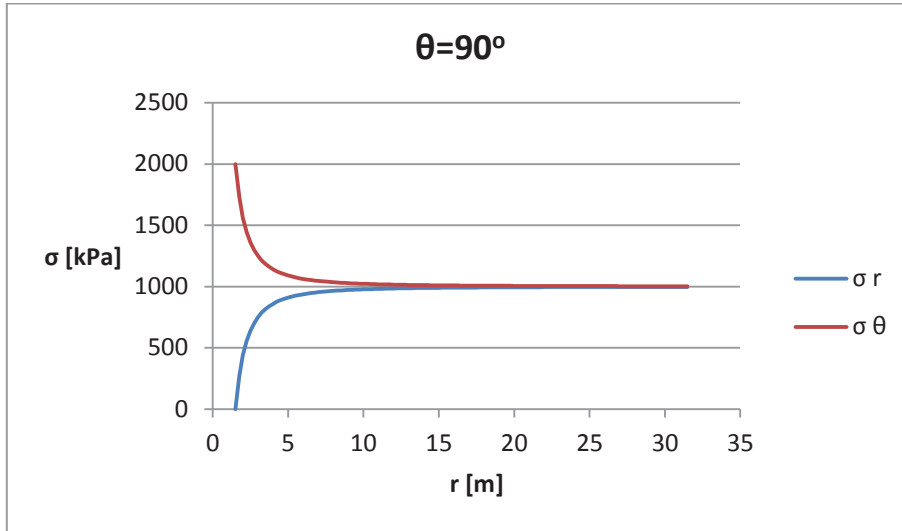


Fig. 5.4 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção vertical, para  $k=1$  com a solução de Kirsch

### 5.1.1.3 Tensões radiais e tangenciais nas direcções $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ , para $k=2$

As tensões representadas nos gráficos das Fig. 5.5 e Fig. 5.6, foram obtidas para valores de  $p_1 = 2000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

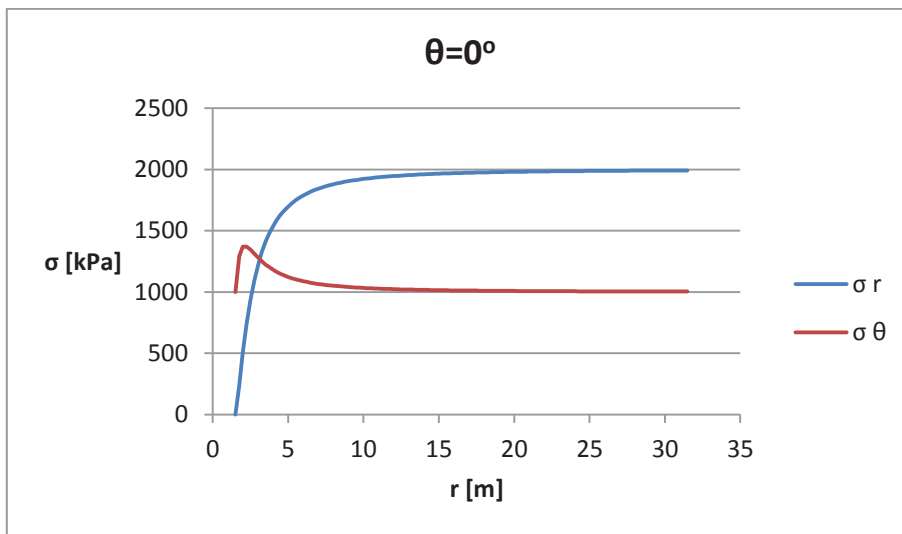


Fig. 5.5 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção horizontal, para  $k=2$  com a solução de Kirsch



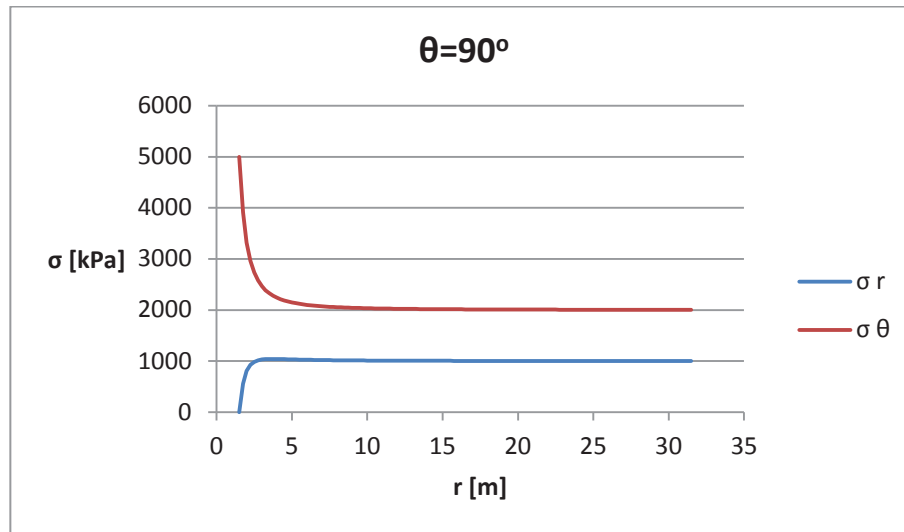


Fig. 5.6 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção vertical, para  $k=2$  com a solução de Kirsch

#### 5.1.1.4 Tensões radiais e tangenciais nas direcções $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ , para $k=3$

As tensões representadas nos gráficos das Fig. 5.7 e Fig. 5.8, foram obtidas para valores de  $p_1 = 3000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

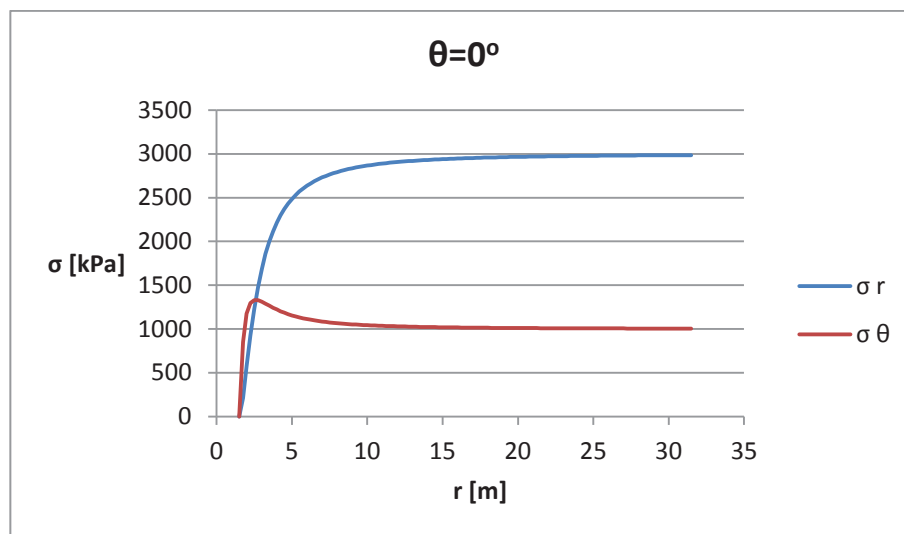


Fig. 5.7 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção horizontal, para  $k=3$  com a solução de Kirsch

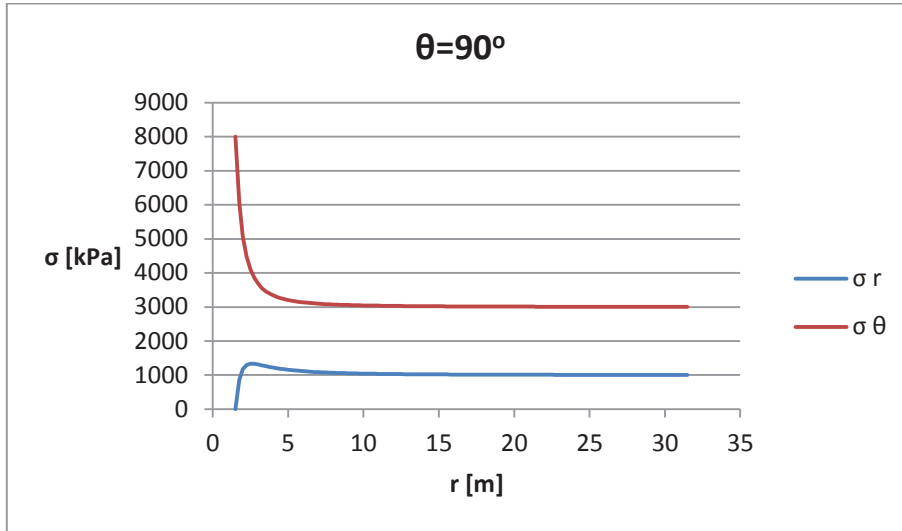


Fig. 5.8 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção vertical, para  $k=3$  com a solução de *Kirsch*

5.1.1.5 Tensões radiais e tangenciais nas direcções  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$ , para  $k=4$

As tensões representadas nos gráficos das Fig. 5.9 e Fig. 5.10, foram obtidas para valores de  $p_1 = 4000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

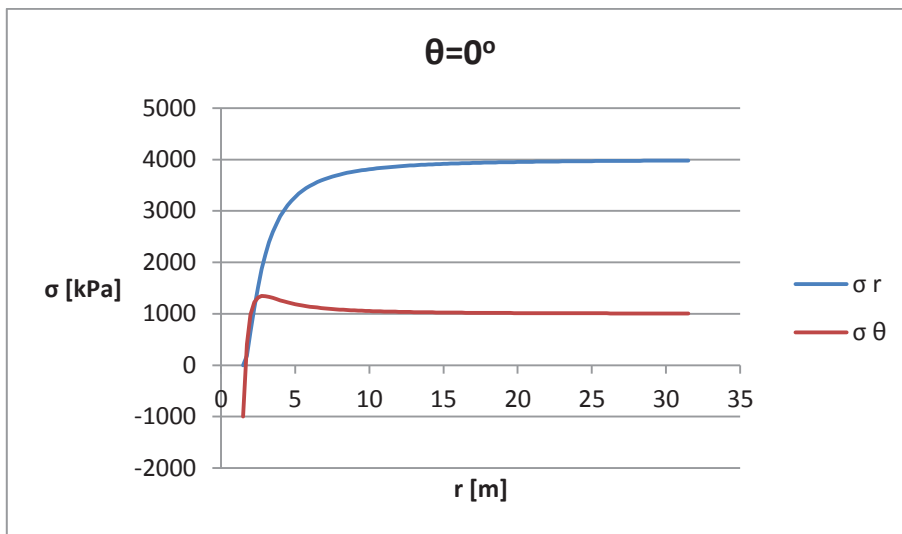


Fig. 5.9 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção horizontal, para  $k=4$  com a solução de *Kirsch*

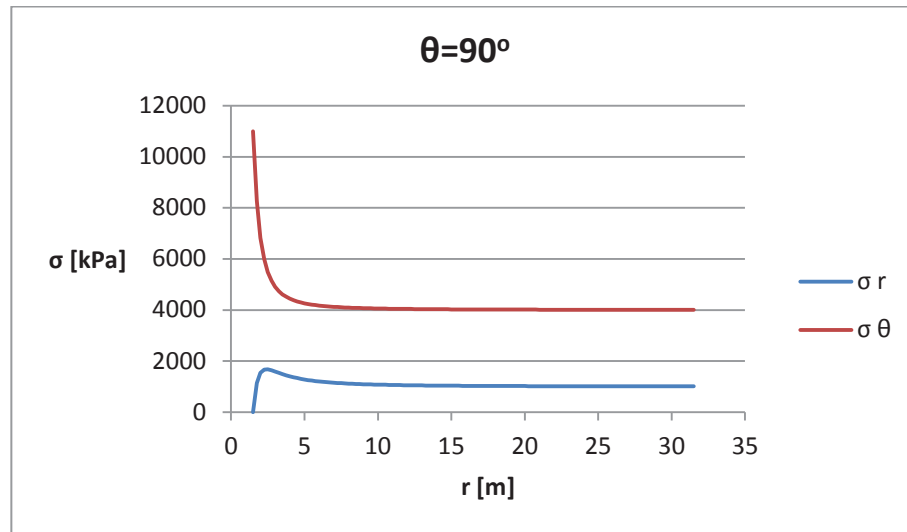


Fig. 5.10 - Gráfico de tensões radiais e tangenciais na direcção vertical, para  $k=4$  com a solução de *Kirsch*

#### 5.1.1.6 Normalização dos resultados de tensões para os vários valores de $k$

A comparação da tendência da evolução das tensões ao longo das direcções consideradas, obtidas para todas as variações de relação tensão inicial, é de mais simples compreensão, se se considerar uma análise em termos de valores normalizados adimensionais.

Para tal efeito, são normalizadas as tensões e os comprimentos em cada direcção de análise. As tensões são normalizadas pelo quociente entre a tensão tangencial e tensão inicial aplicada na direcção vertical  $\frac{\sigma_{\theta}}{p_2}$ . Os comprimentos, por sua vez, são normalizados pela relação entre o raio de obtenção das tensões e o raio da abertura circular  $\frac{r}{a}$ . Sendo assim, consegue-se uma representação gráfica para cada direcção, do valor das tensões normalizadas em função dos comprimentos normalizados, para cada valor de  $k$ .

Para a direcção horizontal, obtém-se assim o gráfico da Fig. 5.11 e para a direcção vertical, obtém-se o gráfico da Fig. 5.12.

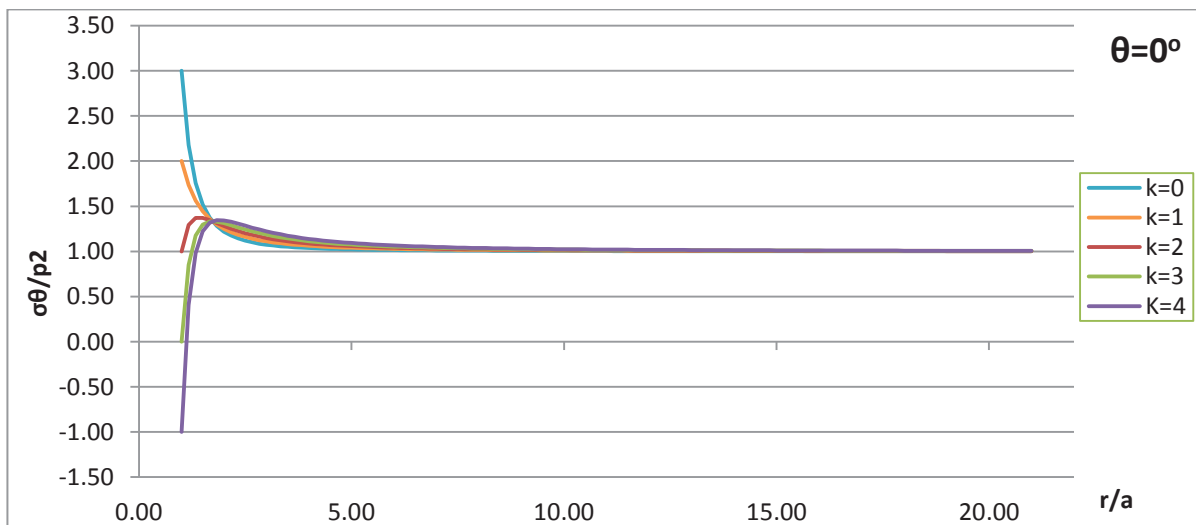


Fig. 5.11 - Gráfico de tensões normalizadas na direcção horizontal, para a solução de *Kirsch*

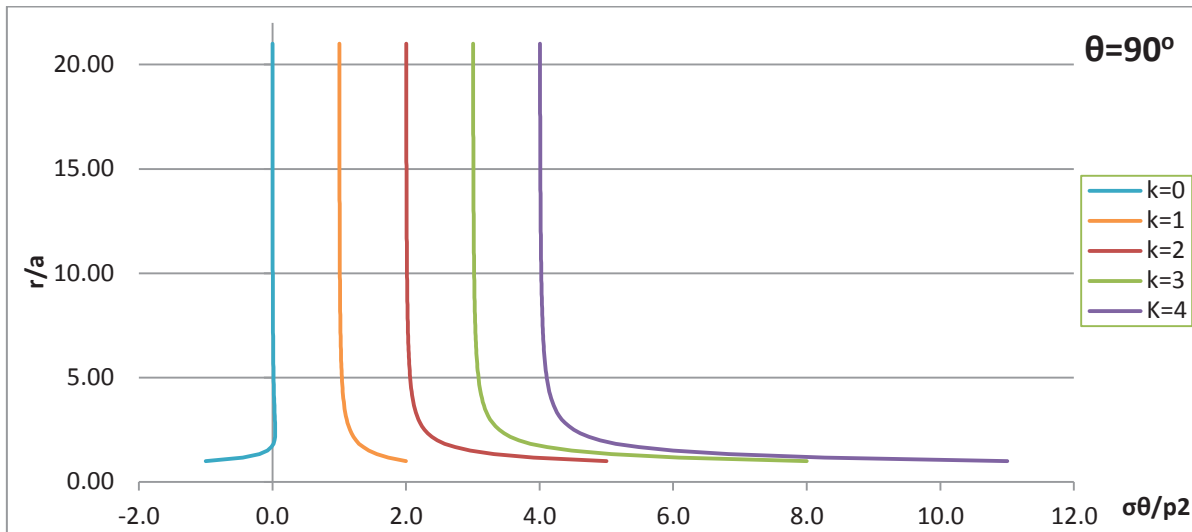


Fig. 5.12 - Gráfico de tensões normalizadas na direcção vertical, para a solução de Kirsch

Pela análise da Fig. 5.11, consegue-se observar, que para todos os valores de  $k$  a tendência de cada gráfico é a aproximação da tensão tangencial normalizada para o valor unitário, à medida que a relação entre as distâncias aumenta. O que significa, que à medida que se caminha no sentido do afastamento da abertura, na direcção horizontal, a tensão tangencial tende a estabilizar para o valor da tensão inicial vertical.

Por outro lado, pela análise da Fig. 5.12, observa-se que cada gráfico correspondente a cada valor de  $k$ , tem a tendência de fazer aproximar a tensão tangencial normalizada, para o respectivo valor de  $k$ , à medida que a relação entre as distâncias aumenta. Como tal, pode-se afirmar que à medida que se caminha no sentido do afastamento da abertura, na direcção vertical, a tensão tangencial tende a estabilizar para o valor da tensão inicial horizontal, uma vez que  $k = \frac{p_1}{p_2}$ .

### 5.1.2 Resultados obtidos para deslocamentos, pela solução de Kirsch

Conforme o descrito no ponto 4.3, com a solução de Kirsch podem-se obter deslocamentos em duas direcções, sendo uma a radial ( $u_r$ ), no sentido exterior e a outra a tangencial ( $u_\theta$ ). Podendo os valores destes deslocamentos, ser obtidos a partir das equações (4.4) e (4.5).

O valor do módulo de distorção ( $G$ ), a entrar nas equações dos movimentos foi obtida a partir da equação (5.1), que o relaciona com o módulo de deformabilidade ( $E$ ) e com o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). (Fernandes 2006)

$$E=2(1-\nu)\times G \quad (5.1)$$

De forma análoga, ao procedido, para a obtenção de resultados de tensões, foram introduzidas as expressões pelas quais se podem obter os deslocamentos, numa folha de cálculo, tendo-se obtido os respectivos valores, para os mesmo incrementos de raio introduzidos em 5.1.1 e no mesmo intervalo de valores (com  $\Delta r = 0,25m$  e  $r \in 1,5; 31,5 m$ ).

Os deslocamentos foram calculados para a direcção horizontal ( $\theta = 0^\circ$ ) e para a direcção vertical ( $\theta = 90^\circ$ ), para os 5 valores de  $k$  considerados, tal como o efectuado para os resultados das tensões.

Os resultados obtidos são apresentados na forma gráfica, nos pontos seguintes, tendo-se apenas representado os resultados obtidos os deslocamentos radiais, uma vez que os valores dos deslocamentos tangenciais obtidos, são praticamente nulos (da ordem da unidade  $\times 10^{-20}$ m), sendo mesmo nulos em alguns casos. Os valores discretos, obtidos pelas folhas de cálculo, podem-se encontrar na secção de Anexos.

#### 5.1.2.1 Deslocamentos radiais nas direcções $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ , para $k=0$

Os deslocamentos nos gráficos das Fig. 5.13 e Fig. 5.14, foram obtidos para valores de  $p_1 = 0 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

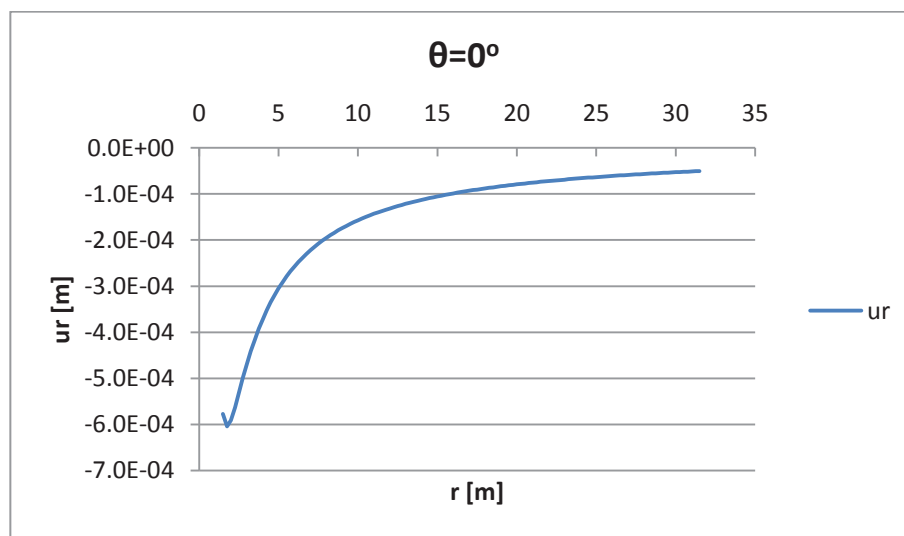


Fig. 5.13 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção horizontal, para  $k=0$  com a solução de *Kirsch*

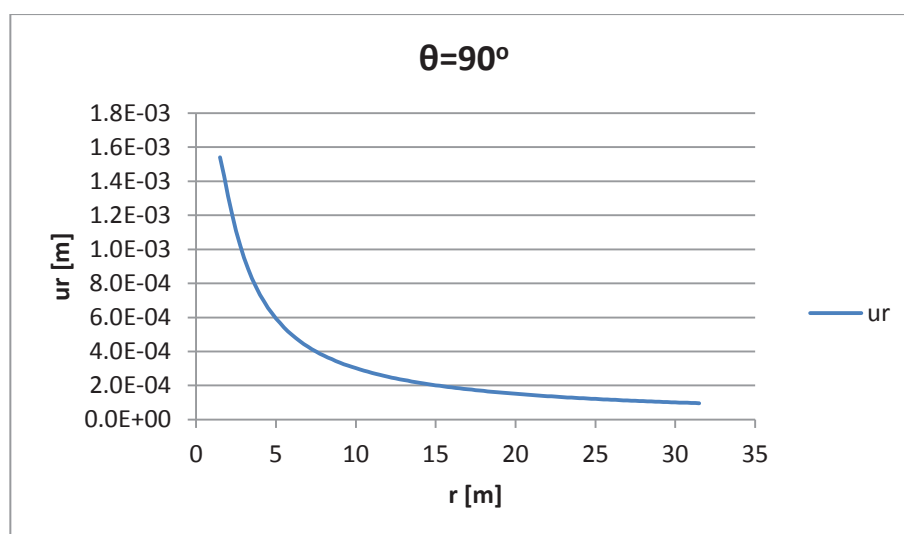


Fig. 5.14 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção vertical, para  $k=0$  com a solução de *Kirsch*

5.1.2.2 Deslocamentos radiais nas direcções  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$ , para  $k=1$

Os deslocamentos nos gráficos das Fig. 5.15 e Fig. 5.16, foram obtidos para valores de  $p_1 = 1000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

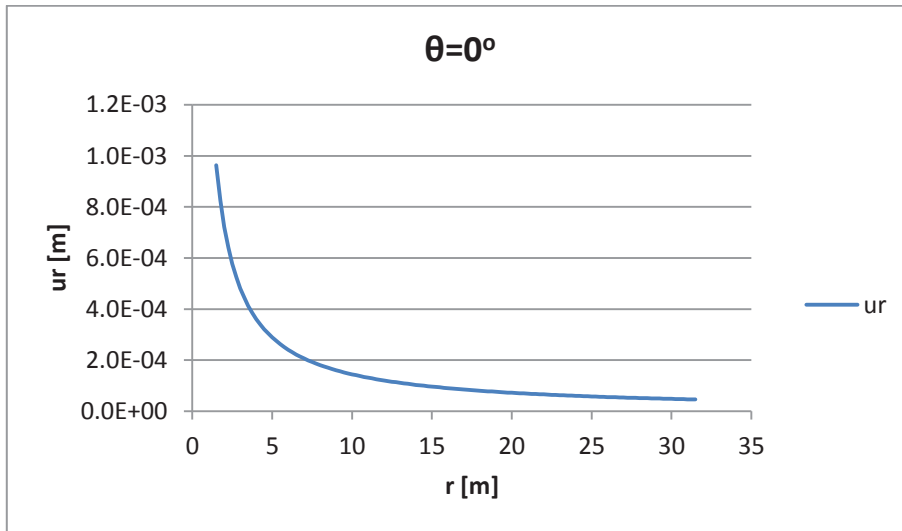


Fig. 5.15 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção horizontal, para  $k=1$  com a solução de *Kirsch*

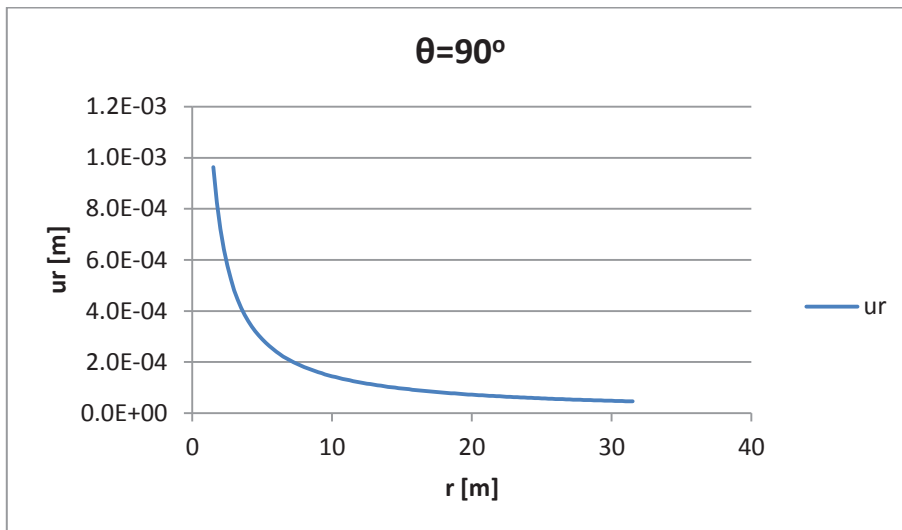


Fig. 5.16 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção vertical, para  $k=1$  com a solução de *Kirsch*



### 5.1.2.3 Deslocamentos radiais nas direcções $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 90^\circ$ , para $k=2$

Os deslocamentos nos gráficos das Fig. 5.17 e Fig. 5.18, foram obtidos para valores de  $p_1 = 2000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

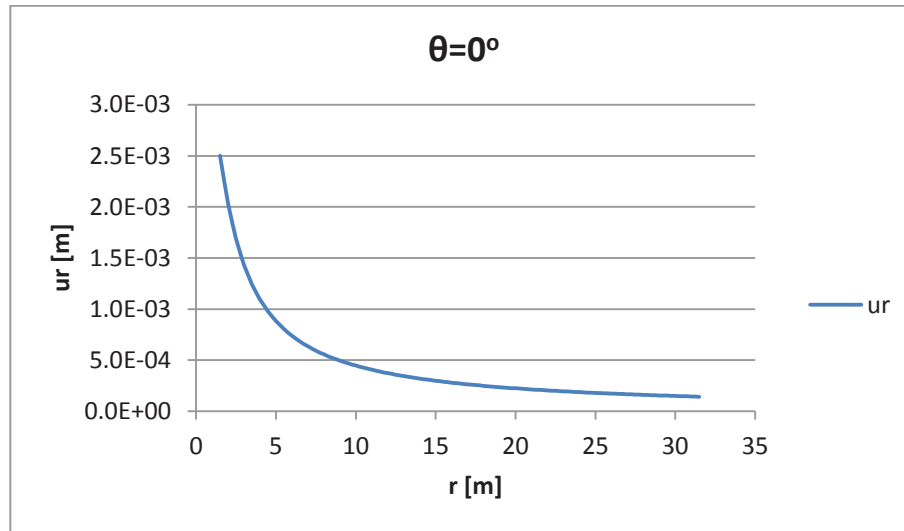


Fig. 5.17 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção horizontal, para  $k=2$  com a solução de Kirsch

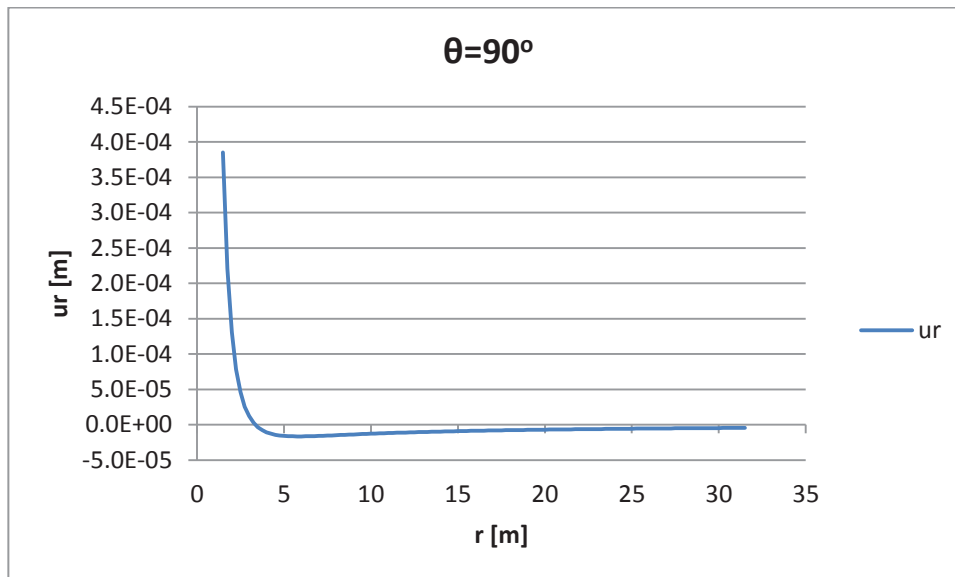


Fig. 5.18 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção vertical, para  $k=2$  com a solução de Kirsch

5.1.2.4 Deslocamentos radiais nas direcções  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$ , para  $k=3$

Os deslocamentos nos gráficos das Fig. 5.19 e Fig. 5.20, foram obtidos para valores de  $p_1 = 3000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

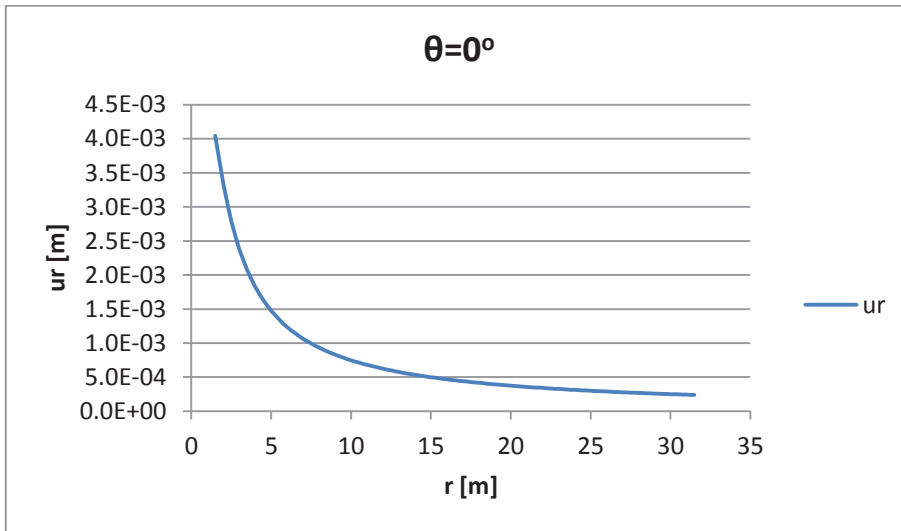


Fig. 5.19 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção horizontal, para  $k=3$  com a solução de *Kirsch*

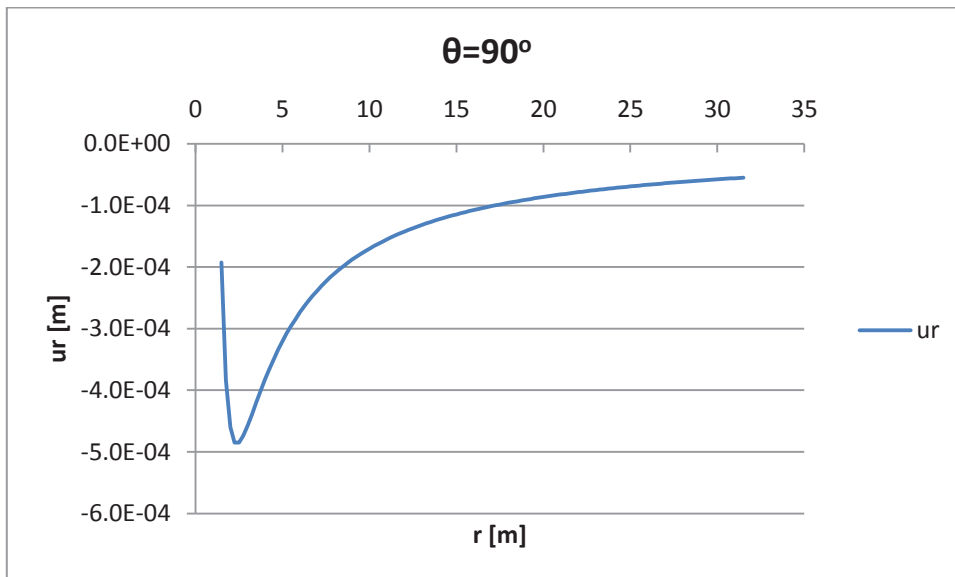


Fig. 5.20 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção vertical, para  $k=3$  com a solução de *Kirsch*

5.1.2.5 Deslocamentos radiais nas direcções  $\theta = 0^\circ$  e  $\theta = 90^\circ$ , para  $k=4$

Os deslocamentos nos gráficos das Fig. 5.21 e Fig. 5.22, foram obtidos para valores de  $p_1 = 4000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

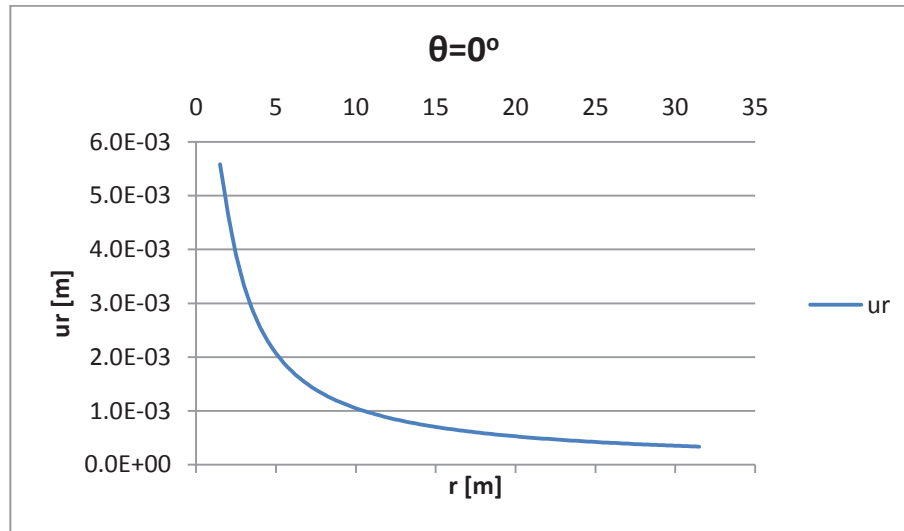


Fig. 5.21 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção horizontal, para  $k=4$  com a solução de *Kirsch*

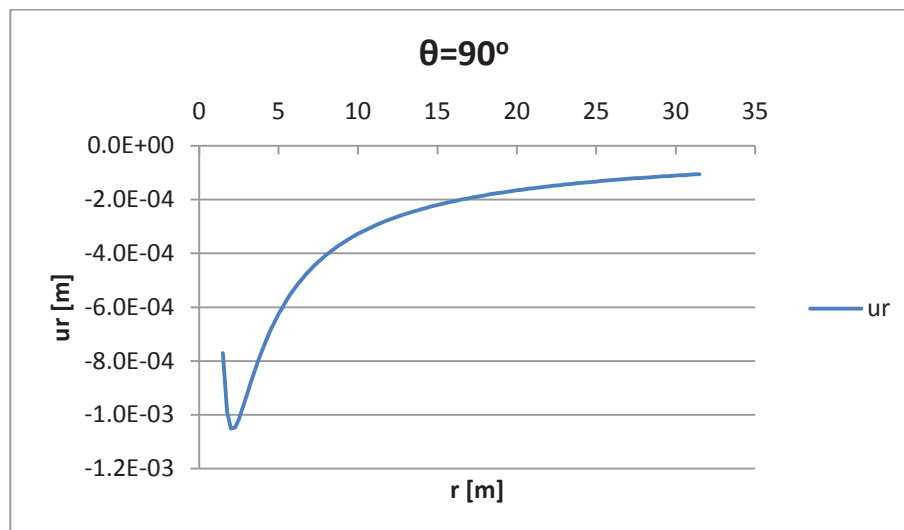


Fig. 5.22 - Gráfico de deslocamentos radiais na direcção vertical, para  $k=4$  com a solução de *Kirsch*

5.1.2.6 Considerações acerca dos resultados obtidos para deslocamentos, pela solução de *Kirsch*

Neste caso de análise de deslocamentos não fará muito sentido, realizar uma comparação em termos de valores relativos, como o que foi feito para o caso das tensões, uma vez que não existe um deslocamento de referência, tal como aconteceu anteriormente, uma componente da tensão inicial fixa.

Pela observação dos gráficos obtidos, pode-se referir que, os deslocamentos em ambas as direcções e para todos os valores de  $k$ , têm a tendência de se aproximarem do valor zero, à medida que se caminha no sentido do afastamento da abertura. Podendo-se mesmo dizer que, são máximos nas imediações da abertura, decrescendo com o aumento do valor de  $r$ , sendo observada, de um modo geral, uma descida mais acentuada para valores até 5m afastados da abertura, sensivelmente.

## 5.2 Resultados obtidos pela modelação no estado plano de deformação

Modelado o problema no programa Phase<sup>2</sup>, para o estado plano de deformação, conforme o descrito no ponto 4.4.2, foi efectuado o cálculo para os 5 valores de  $k$ , tal como foi efectuado para a solução de *Kirsch*. As tensões utilizadas na simulação do estado de tensão inicial, para cada valor de  $k$ , foram as mesmas utilizadas na solução teórica.

Findo o cálculo efectuado pelo programa, com o recurso à interface “interpret”, são obtidos e interpretados os resultados, tal como o próprio nome sugere. O programa permite a obtenção de vários tipos de resultados, sendo neste caso, apenas considerados os resultados em termos de tensões e deslocamentos, como forma de serem comparados com os resultados obtidos pela solução teórica.

Os resultados são fornecidos pela interface gráfica, em forma de contornos de isolinhas, para as variáveis que se pretendem obter. Podendo também, ser obtido resultados numéricos, ao longo de alinhamentos pretendidos.

De modo a comparar os resultados com os da solução teórica, foram definidos dois alinhamentos para obtenção dos resultados numéricos, simulando os mesmos alinhamentos da solução de *Kirsch*. Sendo um alinhamento horizontal tal como o alinhamento em  $\theta = 0^\circ$ , desde o ponto de coordenadas (33.00, -31.50) até ao ponto (63.00, -31.50) e um alinhamento vertical como o alinhamento em  $\theta = 90^\circ$ , a partir do ponto (31.50, -30.00) até ao ponto (31.50, 00.00). Os alinhamentos de recolha de dados, podem ser observados nas Fig. 5.23 e Fig. 5.24, tendo sido utilizados os mesmos, para todos os modelos.

De modo a simular as tensões radial e tangencial da solução teórica, foram obtidas tensões em “x” ( $\sigma_x$ ) e em “y” ( $\sigma_y$ ), que no alinhamento horizontal  $\sigma_x$  corresponde a  $\sigma_r$  e  $\sigma_y$  corresponde a  $\sigma_\theta$ , invertendo a correspondência no alinhamento vertical, onde  $\sigma_x$  corresponde a  $\sigma_\theta$  e  $\sigma_y$  corresponde a  $\sigma_r$ , isto por uma questão de referencial.

O mesmo acontece em relação aos deslocamentos, embora como só foram apresentados os deslocamentos no sentido radial para a solução teórica, também só se apresentam os resultados para os sentidos paralelos aos alinhamentos considerados no programa. Onde no alinhamento horizontal, o deslocamento radial ( $u_r$ ) corresponde a um deslocamento em “x” ( $u_x$ ) e no alinhamento vertical,  $u_r$  corresponde a um deslocamento em “y” ( $u_y$ ).

Por forma a ser melhor compreendida a correspondência de sentidos, é apresentada a Tabela 5.1.

### 5.2.1 Resultados obtidos para tensões, pelo modelo no estado plano de deformação

Seguidamente são apresentados os resultados em termos de tensões, obtidos para cada valor de  $k$ . São apresentadas as distribuições das isolinhas de tensão para cada direcção, obtidas no programa e também os gráficos correspondentes às tensões obtidas para os dois alinhamentos de recolha de dados considerados, horizontal e vertical.

Em cada alinhamento foram recolhidos os dados das tensões para 100 pontos igualmente espaçados, sendo estes resultados tratados com o recurso a folhas de cálculo, por forma a apresentar os resultados na forma de gráficos, para uma melhor interpretação e comparação. Os valores discretos obtidos são apresentados na secção de Anexos.

Tabela 5.1 - Relações entre os sentidos dos resultados obtidos, para a solução teórica e para o modelo numérico

	Solução Teórica	Modelação Numérica
Direcções	$\theta = 0^\circ$	“x”
	$\theta = 90^\circ$	“y”
Ao longo do alinhamento horizontal	$\sigma_r$	$\sigma_x$
	$\sigma_\theta$	$\sigma_y$
	$u_r$	$u_x$
Ao longo do alinhamento vertical	$\sigma_r$	$\sigma_y$
	$\sigma_\theta$	$\sigma_x$
	$u_r$	$u_r$

#### 5.2.1.1 Tensões em “x” e em “y” nas direcções horizontal e vertical, para $k=0$

As tensões representadas na distribuição de isolinhas das Fig. 5.23 e Fig. 5.24 e nos gráficos das Fig. 5.25 e Fig. 5.26, foram obtidas para valores de  $p_1 = 0 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

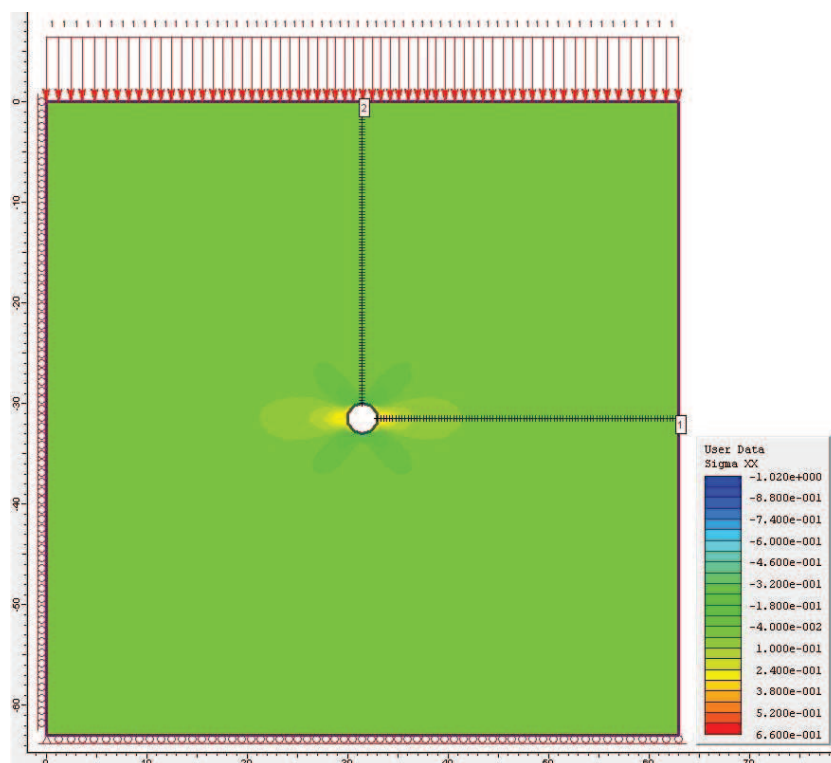


Fig. 5.23 - Distribuição de tensões  $\sigma_x$ , para  $k=0$  com modelo do estado plano de deformação

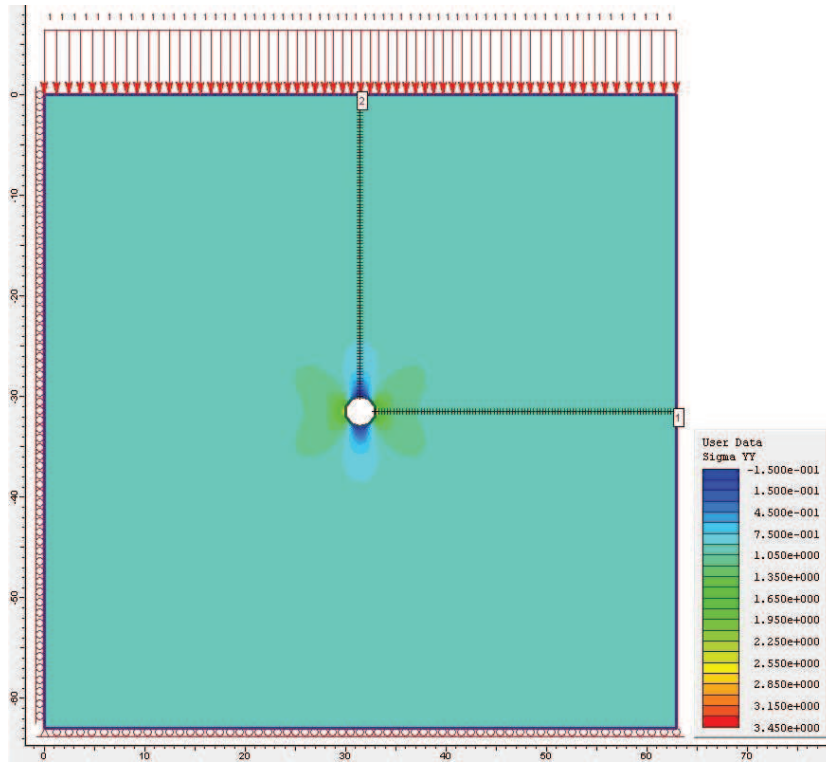


Fig. 5.24 - Distribuição de tensões  $\sigma_y$ , para  $k=0$  com modelo do estado plano de deformação

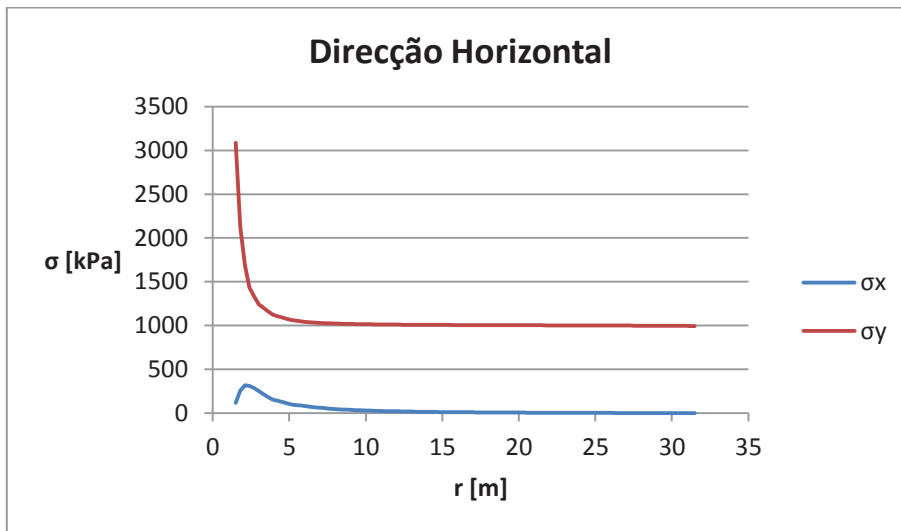


Fig. 5.25 - Gráfico de tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ , na direcção horizontal, para  $k=0$  com modelo do estado plano de deformação



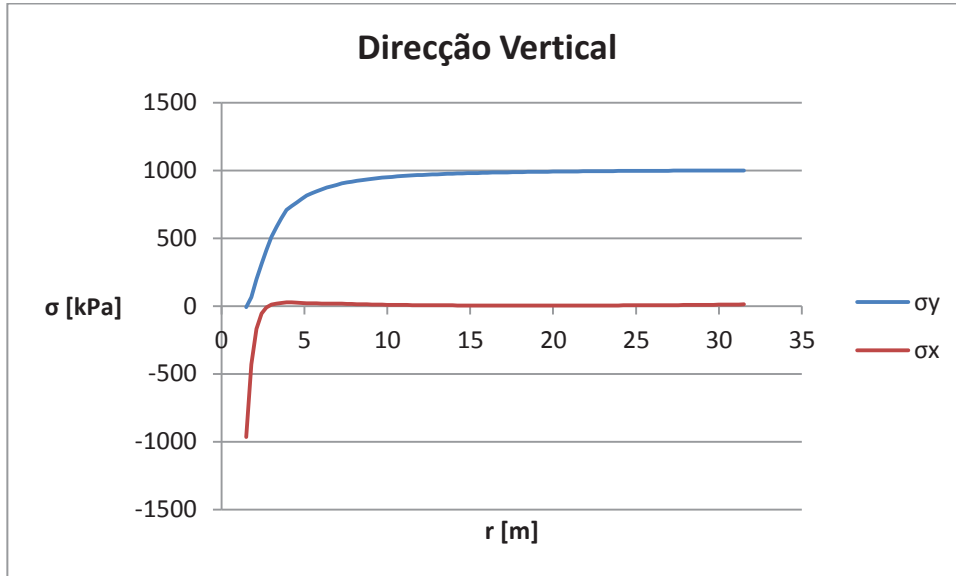


Fig. 5.26 - Gráfico de tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  na direcção vertical, para  $k=0$  com modelo do estado plano de deformação

#### 5.2.1.2 Tensões em “x” e em “y” nas direcções horizontal e vertical, para $k=1$

As tensões representadas na distribuição de isolinhas das Fig. 5.27 e Fig. 5.28 e nos gráficos das Fig. 5.29 e Fig. 5.30, foram obtidas para valores de  $p_1 = 1000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

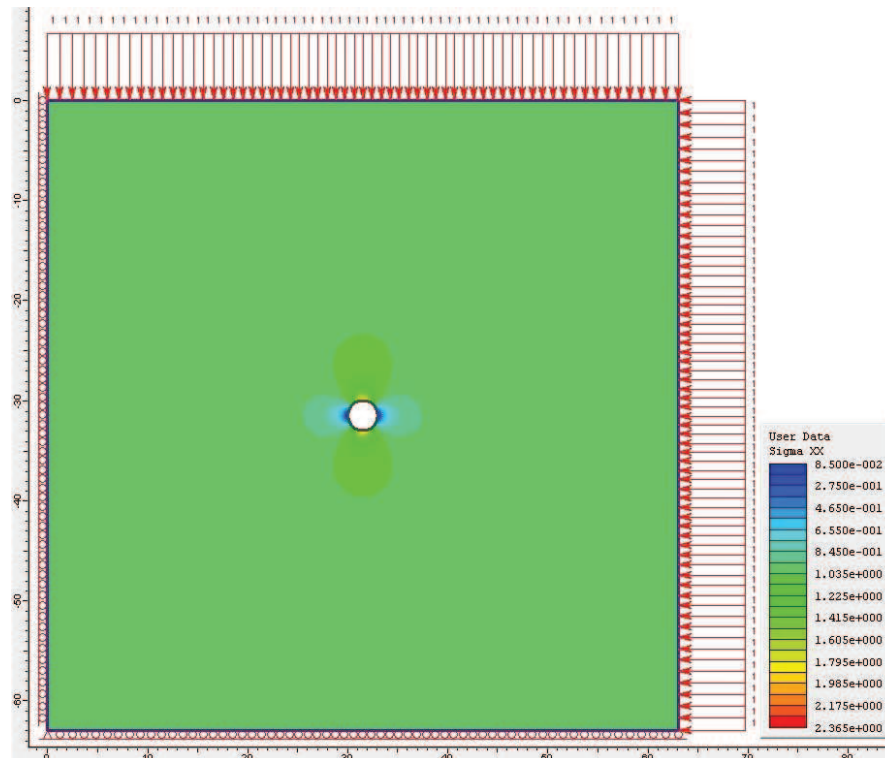
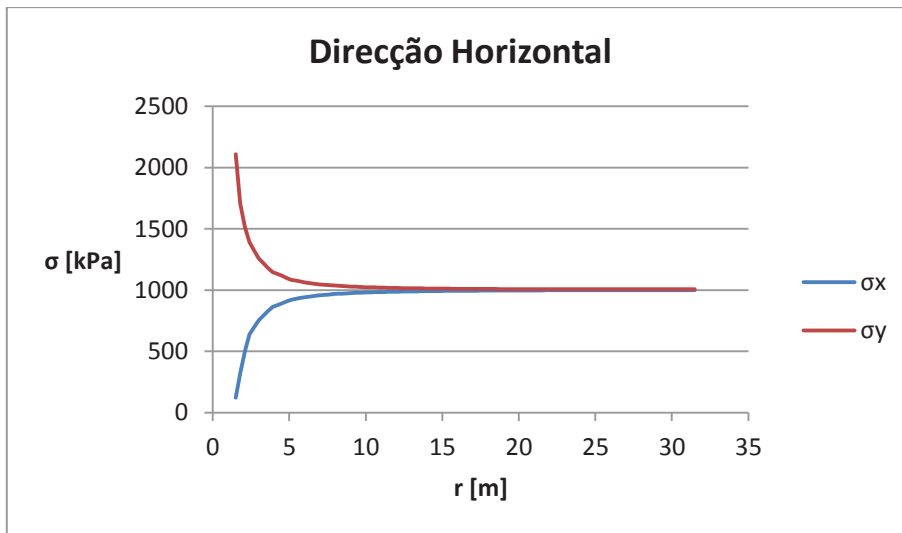
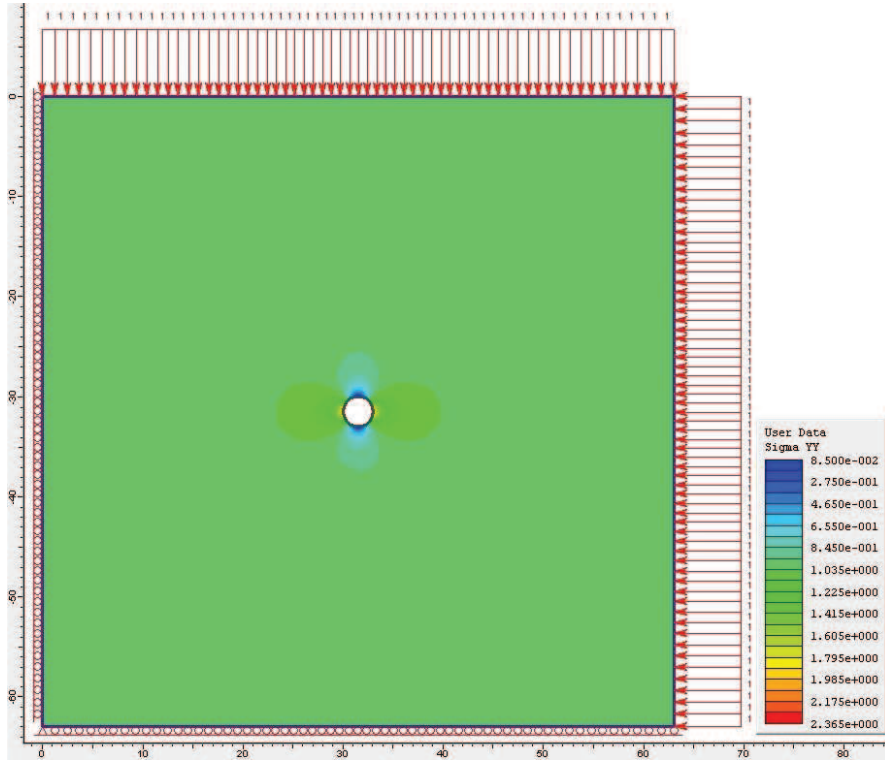


Fig. 5.27 - Distribuição de tensões  $\sigma_x$ , para  $k=1$  com modelo do estado plano de deformação



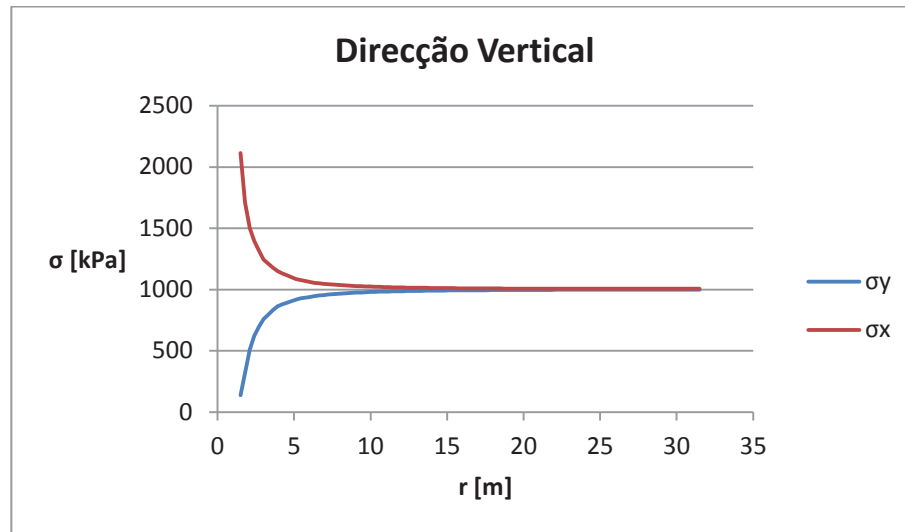


Fig. 5.30 - Gráfico de tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  na direcção vertical, para  $k=1$  com modelo do estado plano de deformação

### 5.2.1.3 Tensões em “x” e em “y” nas direcções horizontal e vertical, para $k=2$

As tensões representadas na distribuição de isolinhas das Fig. 5.31 e Fig. 5.32 e nos gráficos das Fig. 5.33 e Fig. 5.34, foram obtidas para valores de  $p_1 = 2000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

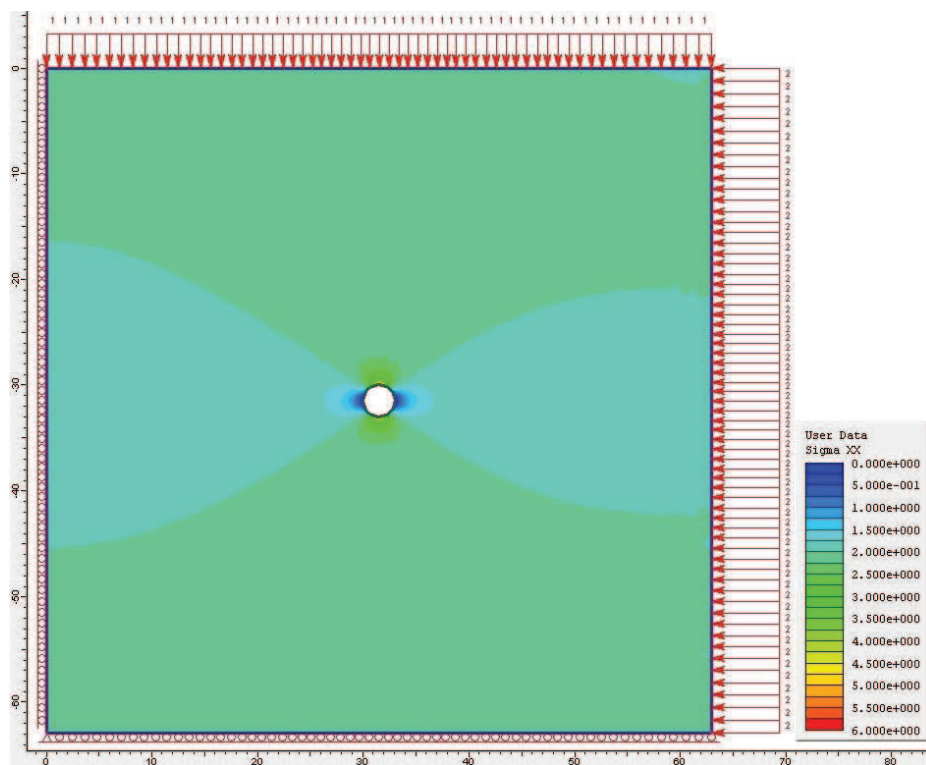


Fig. 5.31 - Distribuição de tensões  $\sigma_x$ , para  $k=2$  com modelo do estado plano de deformação

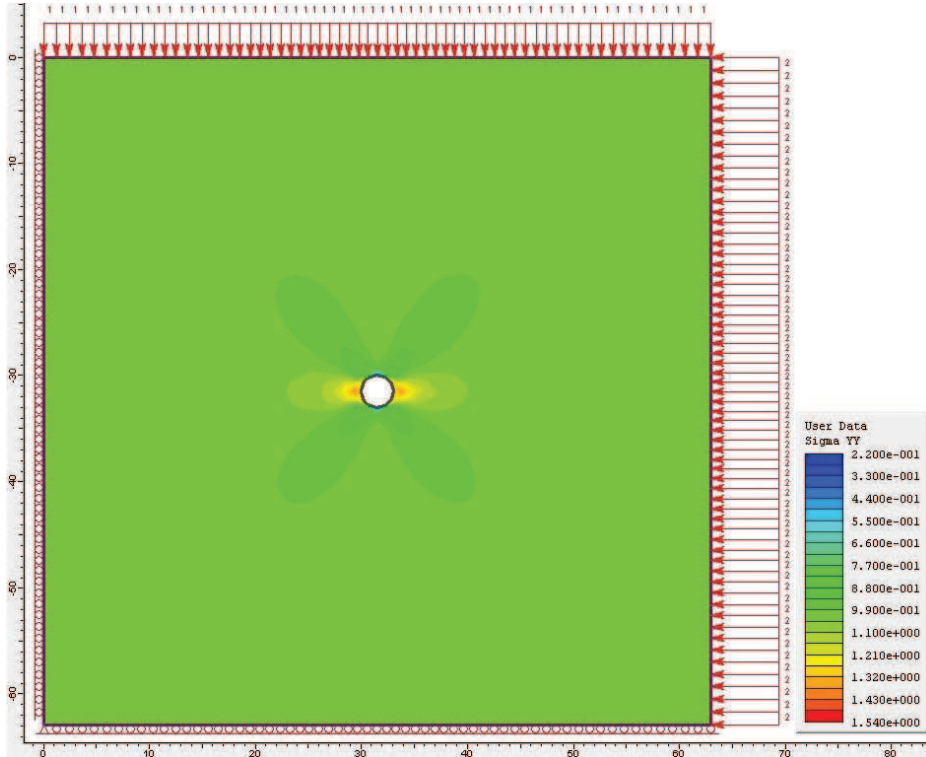


Fig. 5.32 - Distribuição de tensões  $\sigma_y$ , para  $k=2$  com modelo do estado plano de deformação

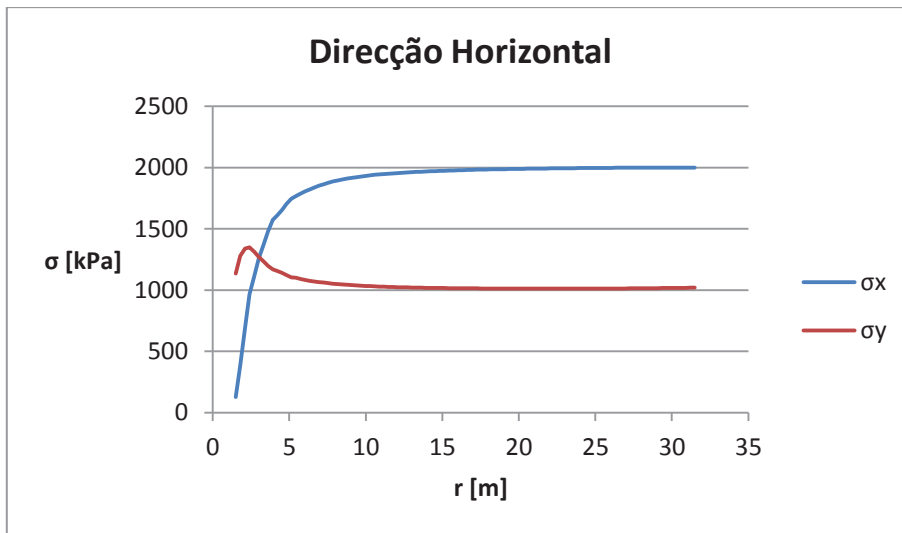


Fig. 5.33 - Gráfico de tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ , na direcção horizontal, para  $k=2$  com modelo do estado plano de deformação

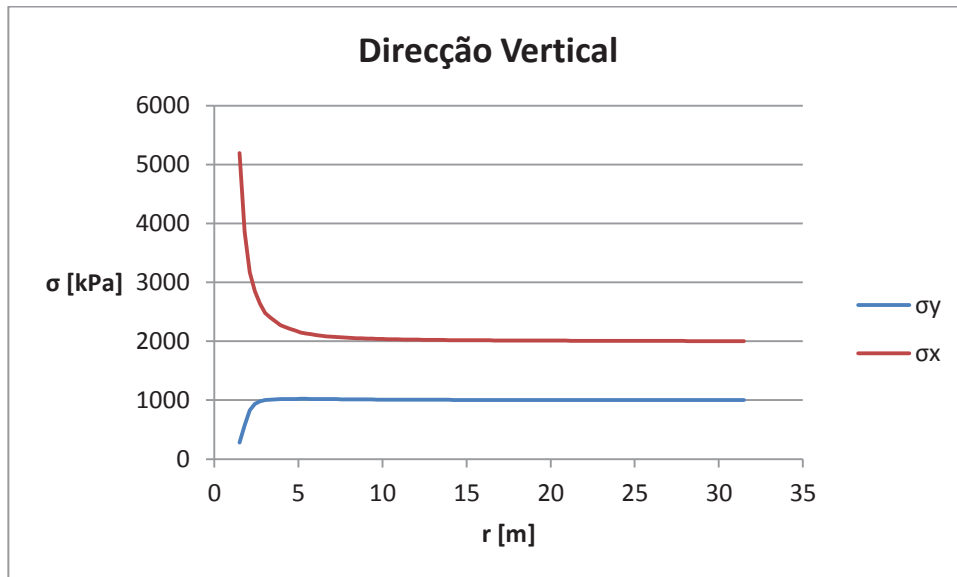


Fig. 5.34 - Gráfico de tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  na direcção vertical, para  $k=2$  com modelo do estado plano de deformação

#### 5.2.1.4 Tensões em “x” e em “y” nas direcções horizontal e vertical, para $k=3$

As tensões representadas na distribuição de isolinhas das Fig. 5.35 e Fig. 5.36 e nos gráficos das Fig. 5.37 e Fig. 5.38, foram obtidas para valores de  $p_1 = 3000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

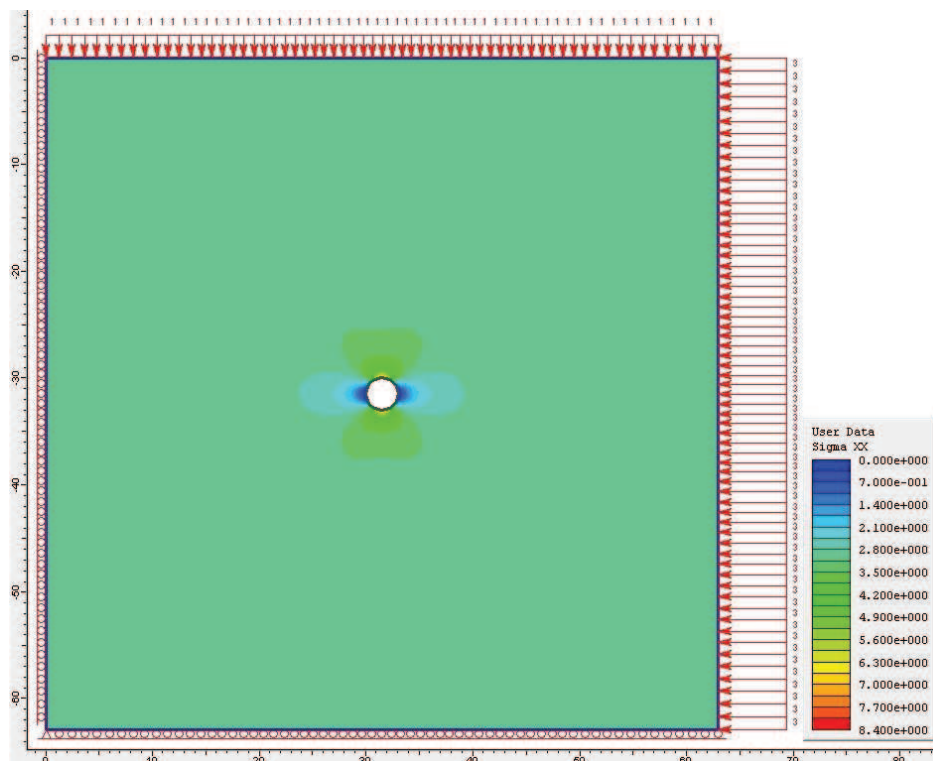


Fig. 5.35 - Distribuição de tensões  $\sigma_x$ , para  $k=3$  com modelo do estado plano de deformação

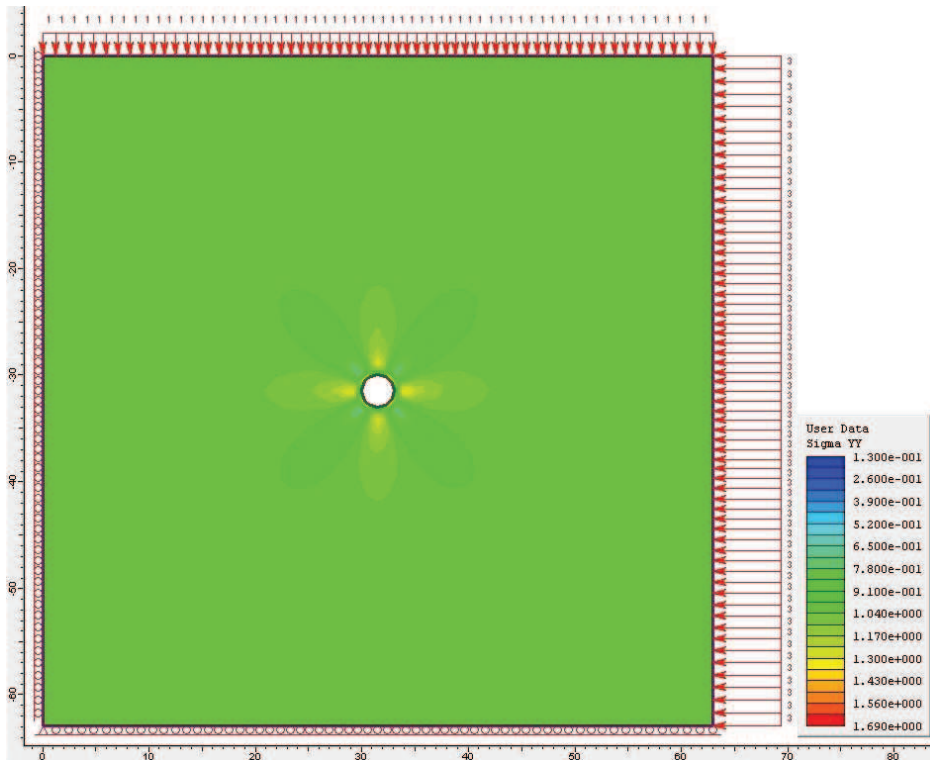


Fig. 5.36 - Distribuição de tensões  $\sigma_y$ , para  $k=3$  com modelo do estado plano de deformação

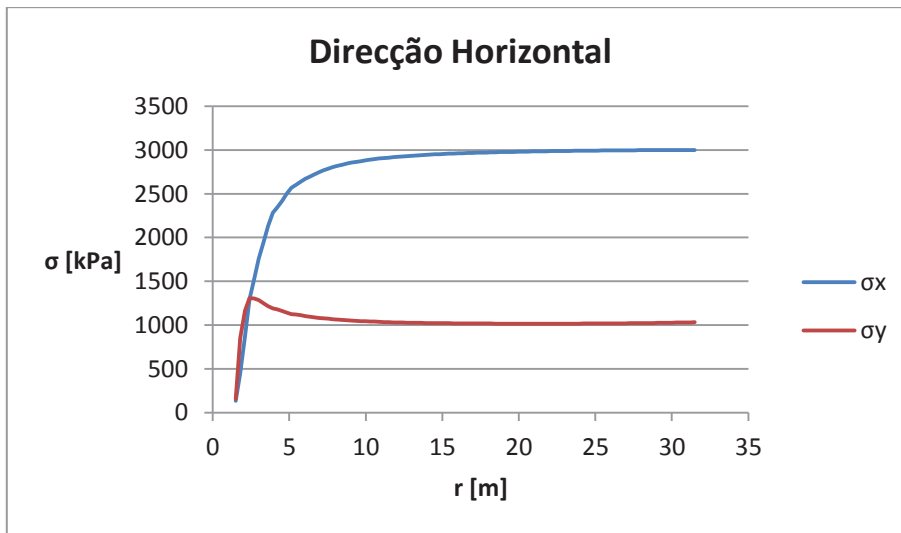


Fig. 5.37 - Gráfico de tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ , na direcção horizontal, para  $k=3$  com modelo do estado plano de deformação



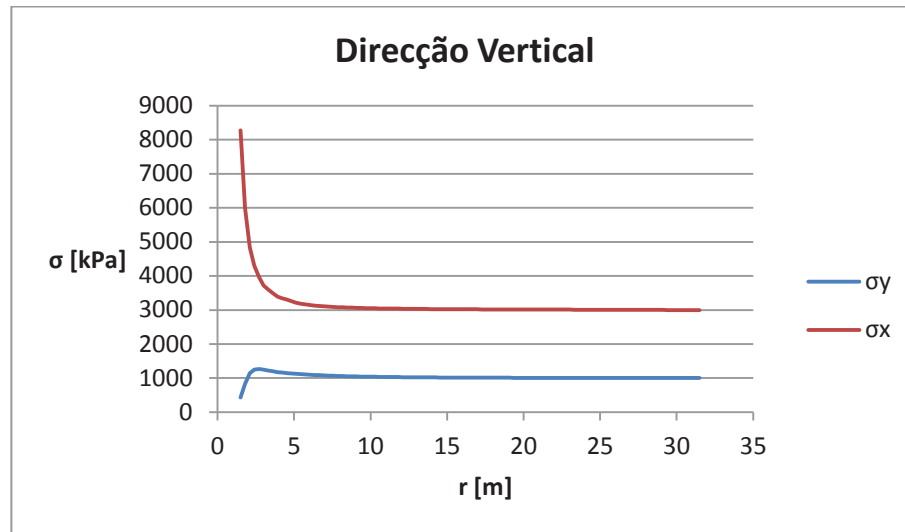


Fig. 5.38 - Gráfico de tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  na direcção vertical, para  $k=3$  com modelo do estado plano de deformação

#### 5.2.1.5 Tensões em "x" e em "y" nas direcções horizontal e vertical, para $k=4$

As tensões representadas na distribuição de isolinhas das Fig. 5.39 e Fig. 5.40 e nos gráficos das Fig. 5.41 e Fig. 5.42, foram obtidas para valores de  $p_1 = 4000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

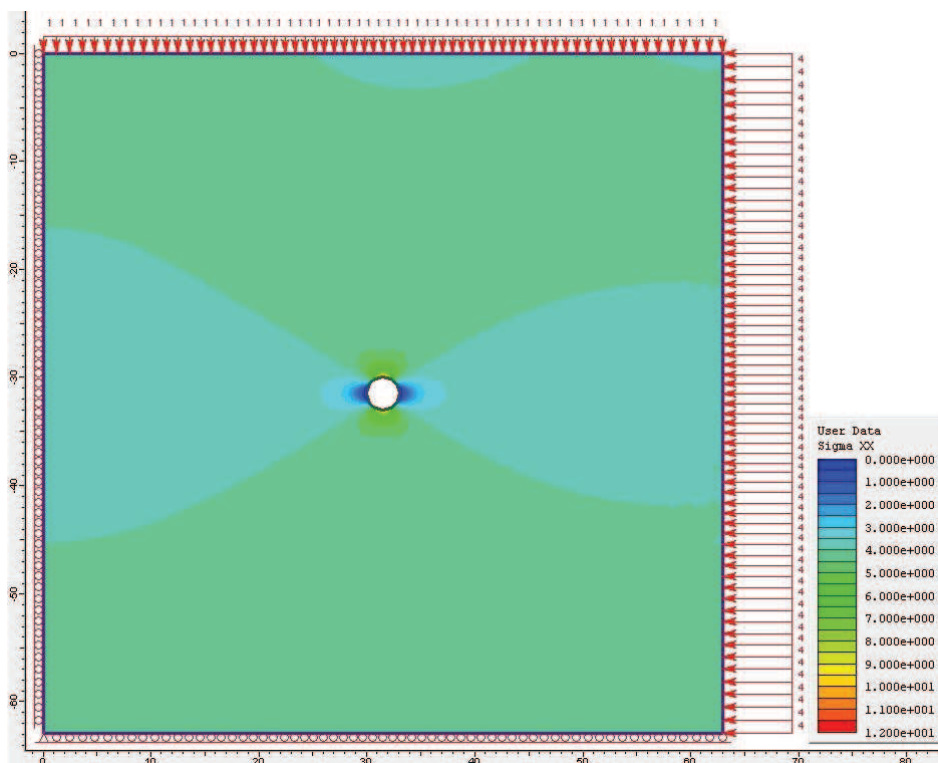


Fig. 5.39 - Distribuição de tensões  $\sigma_x$ , para  $k=4$  com modelo do estado plano de deformação

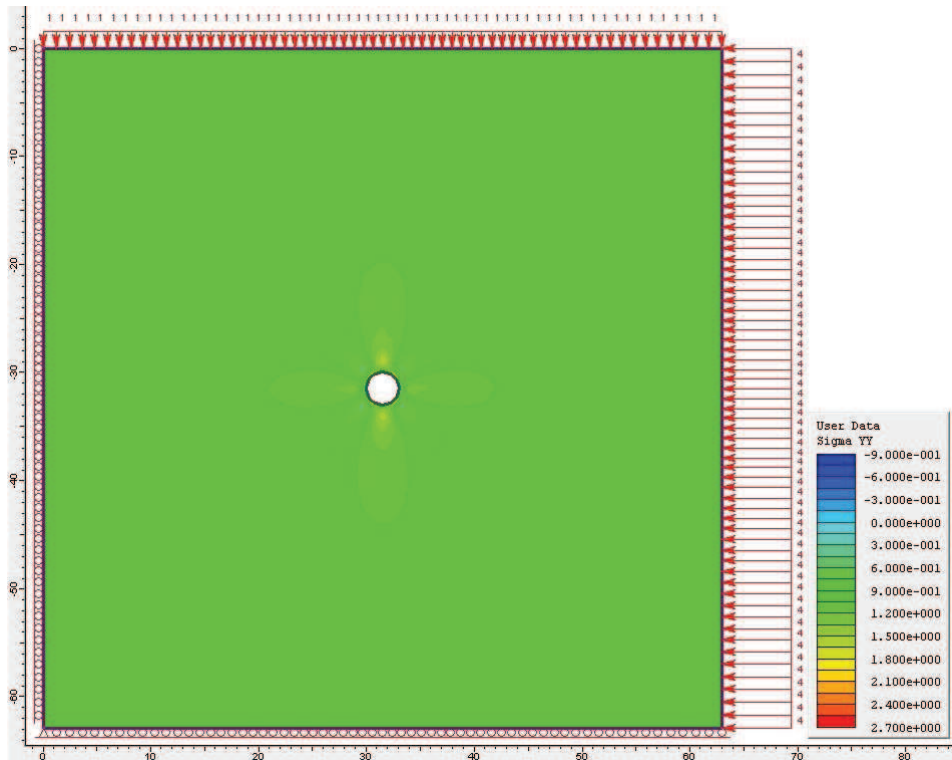


Fig. 5.40 - Distribuição de tensões  $\sigma_y$ , para  $k=4$  com modelo do estado plano de deformação

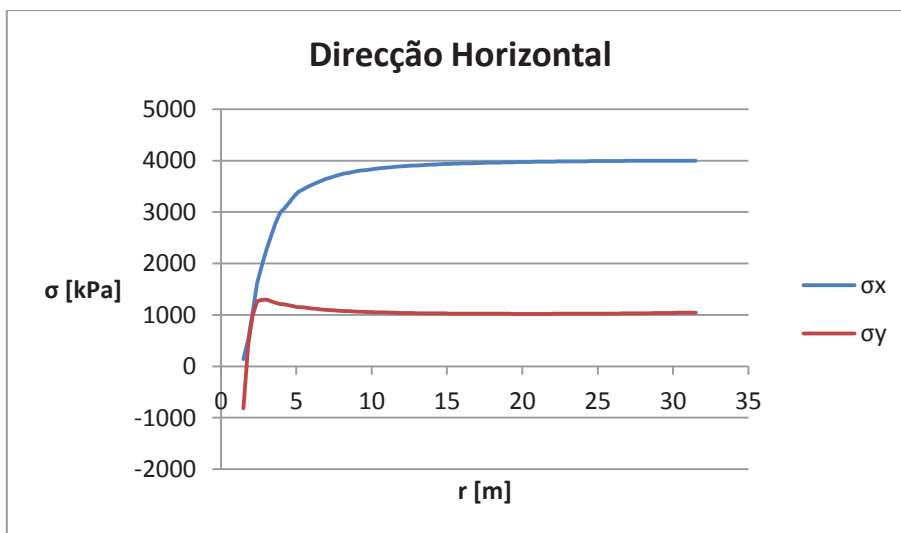


Fig. 5.41 - Gráfico de tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ , na direcção horizontal, para  $k=4$  com modelo do estado plano de deformação

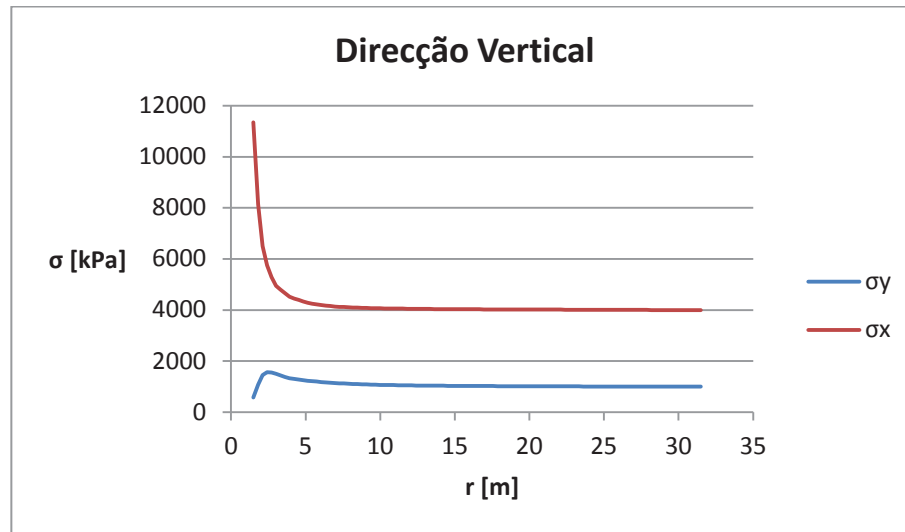


Fig. 5.42 - Gráfico de tensões  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  na direcção vertical, para  $k=4$  com modelo do estado plano de deformação

### 5.2.2 Resultados obtidos para deslocamentos, pelo modelo no estado plano de deformação

Com um procedimento, em tudo, análogo ao efectuado para obtenção das tensões, foram obtidos os deslocamentos ao longo dos alinhamentos de recolha de dados definidos. Nestes caso, apenas foram seleccionados os deslocamentos em “x”, para o alinhamento horizontal e os deslocamentos em “y”, para o alinhamento vertical, uma vez que os deslocamentos perpendiculares aos alinhamentos de recolha de dados não são analisados, pelo descrito em 5.1.2.

São apresentados os gráficos da distribuição dos deslocamentos pelo maciço e os gráficos dos deslocamentos ao longo dos alinhamentos, horizontal e vertical, após processamentos de dados por meio de folhas de cálculo. Os valores discretos, obtidos na análise podem ser encontrados na secção de Anexos.

#### 5.2.2.1 Deslocamentos radiais ( $u_x$ e $u_y$ ) nas direcções, horizontal e vertical, para $k=0$

Os deslocamentos representados na distribuição de isolinhas das Fig. 5.43 e Fig. 5.44 e nos gráficos das Fig. 5.45 e Fig. 5.46, foram obtidas para valores de  $p_1 = 0 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

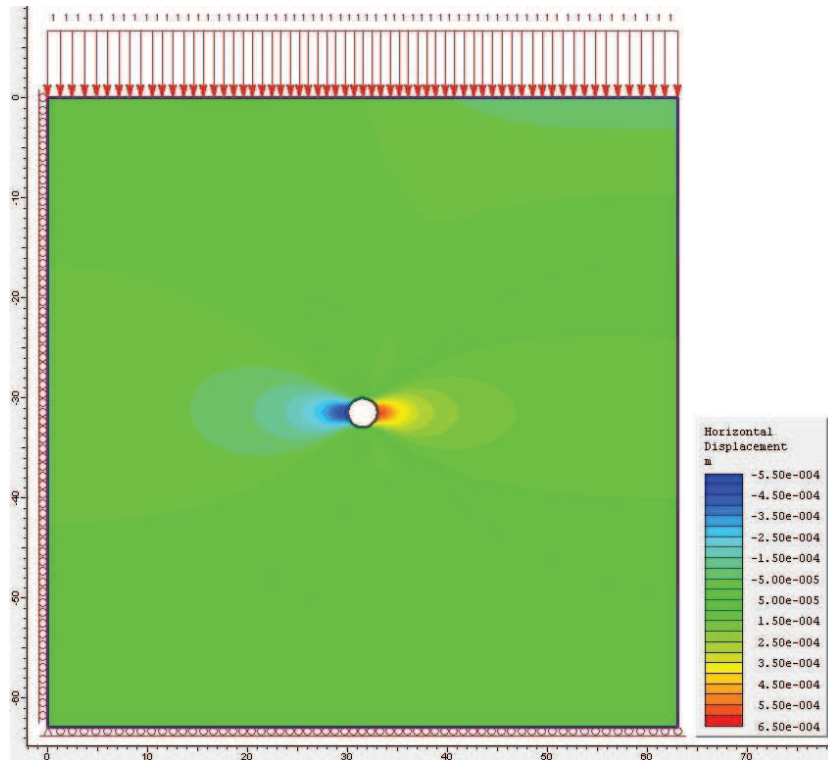


Fig. 5.43 - Distribuição de deslocamentos  $u_x$ , para  $k=0$  com modelo do estado plano de deformação

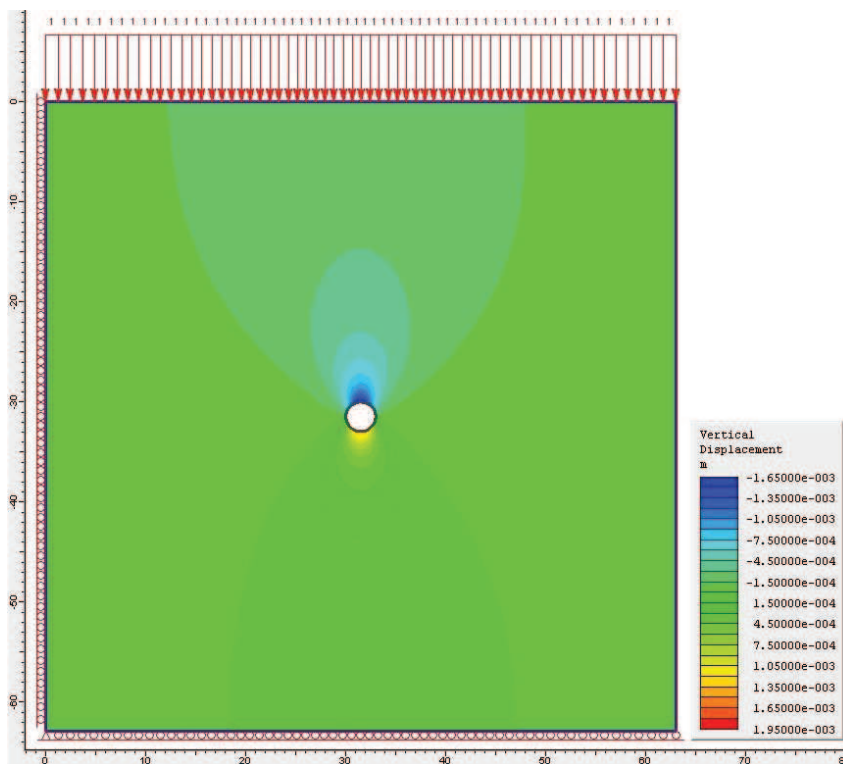


Fig. 5.44 - Distribuição de deslocamentos  $u_y$ , para  $k=0$  com modelo do estado plano de deformação

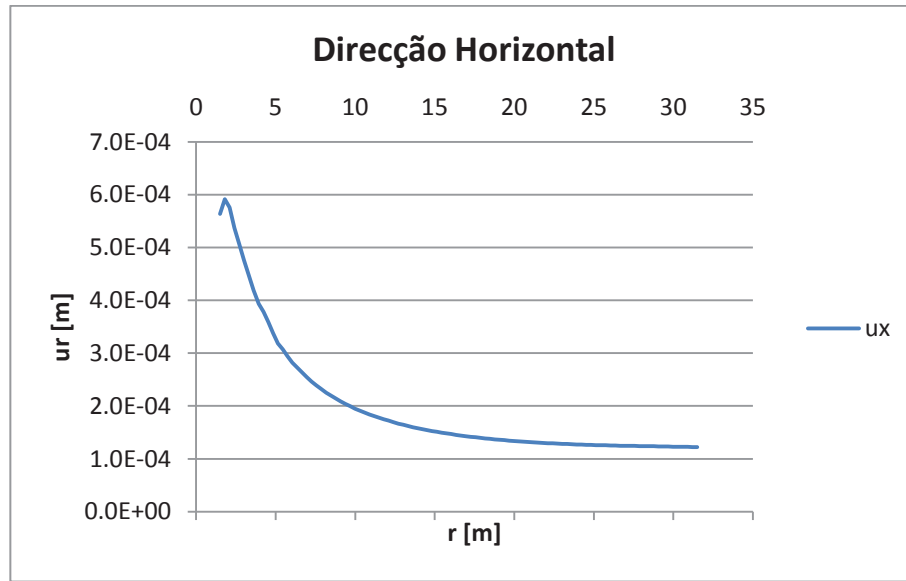


Fig. 5.45 - Gráfico de deslocamentos  $u_x$  na direcção horizontal, para  $k=0$  com modelo do estado plano de deformação

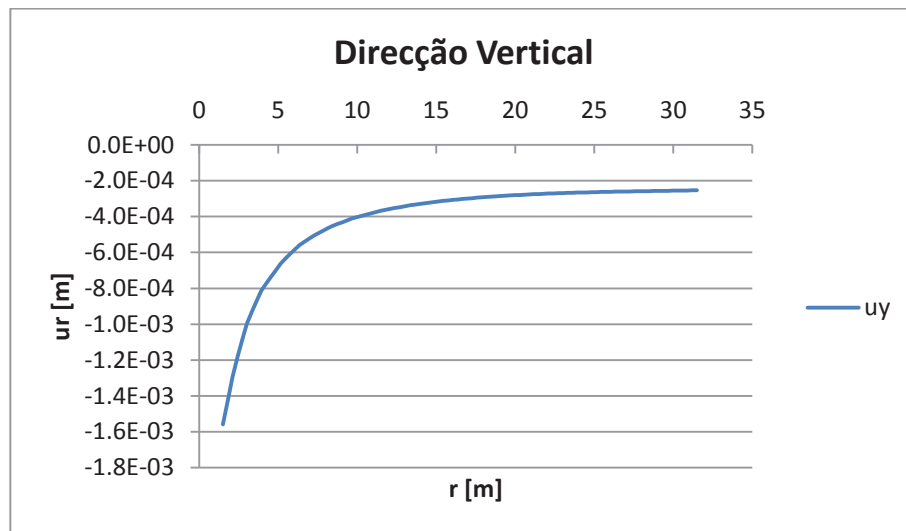


Fig. 5.46 - Gráfico de deslocamentos  $u_y$  na direcção vertical, para  $k=0$  com modelo do estado plano de deformação

### 5.2.2.2 Deslocamentos radiais ( $u_x$ e $u_y$ ) nas direcções, horizontal e vertical, para $k=1$

Os deslocamentos representados na distribuição de isolinhas das Fig. 5.47 e Fig. 5.48 e nos gráficos das Fig. 5.49 e Fig. 5.50, foram obtidas para valores de  $p_1 = 1000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

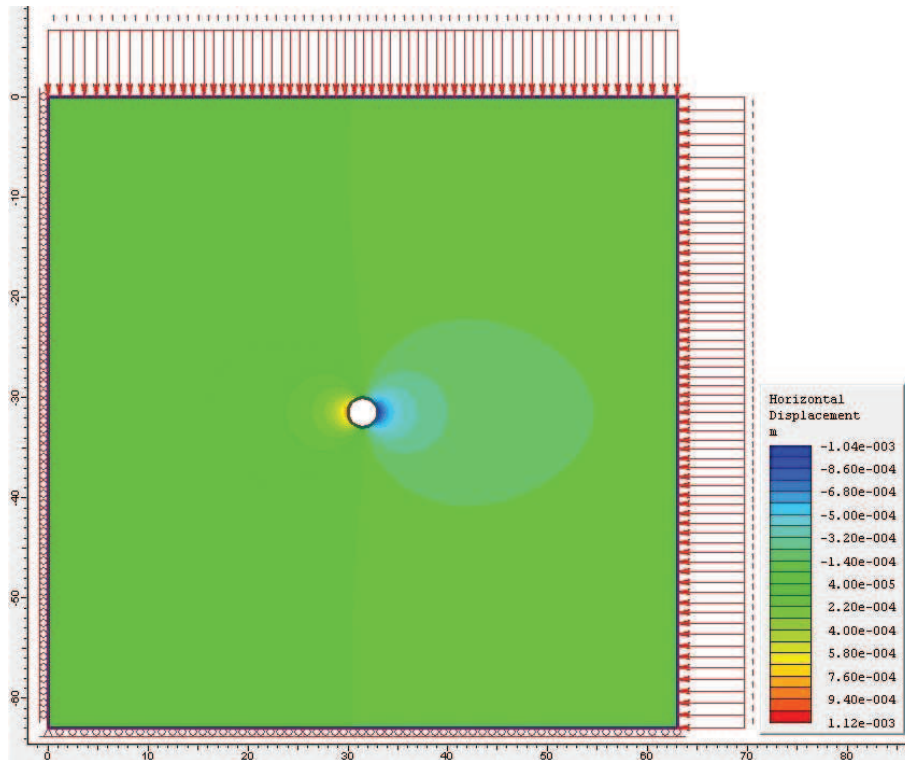


Fig. 5.47 - Distribuição de deslocamentos  $u_x$ , para  $k=1$  com modelo do estado plano de deformação

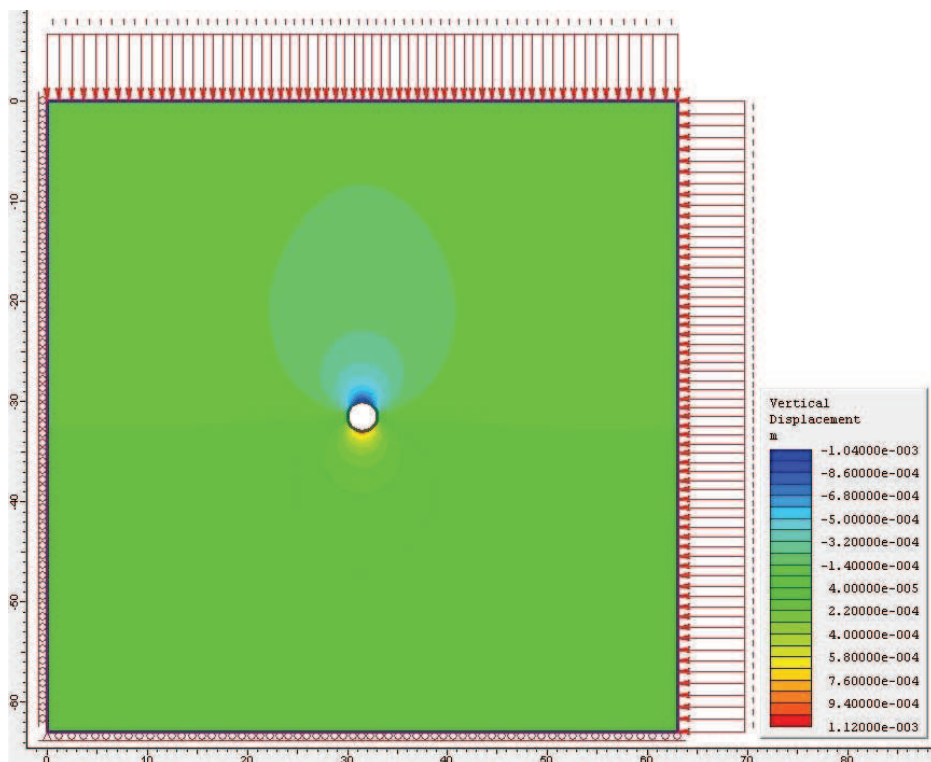


Fig. 5.48 - Distribuição de deslocamentos  $u_y$ , para  $k=1$  com modelo do estado plano de deformação



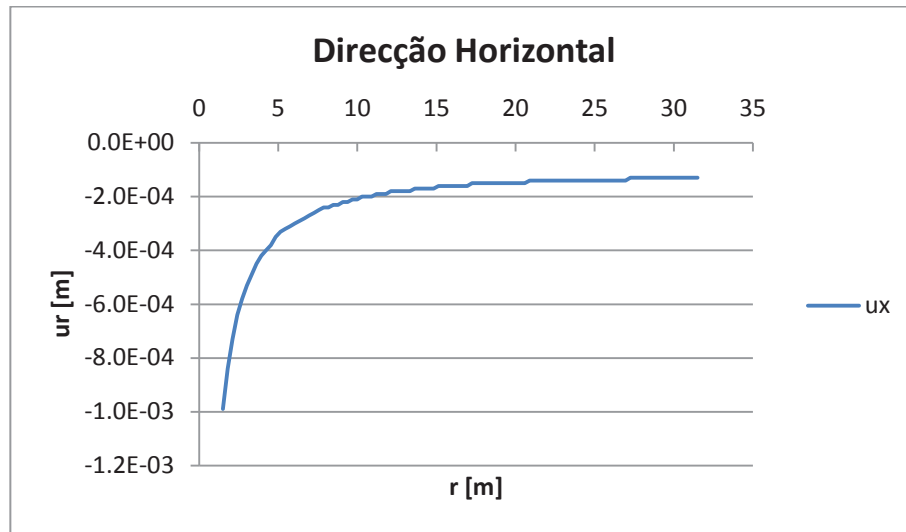


Fig. 5.49 - Gráfico de deslocamentos  $u_x$  na direcção horizontal, para  $k=1$  com modelo do estado plano de deformação

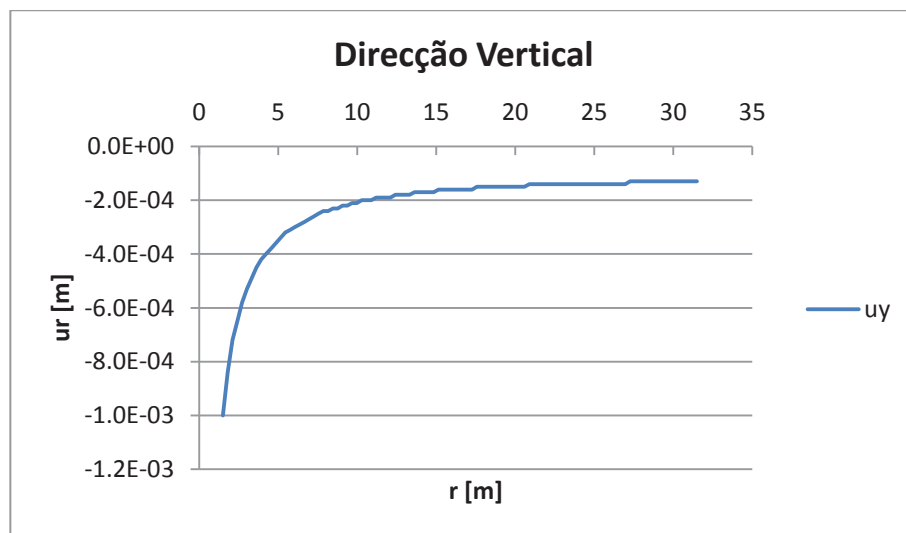


Fig. 5.50 - Gráfico de deslocamentos  $u_y$  na direcção vertical, para  $k=1$  com modelo do estado plano de deformação

### 5.2.2.3 Deslocamentos radiais ( $u_x$ e $u_y$ ) nas direcções, horizontal e vertical, para $k=2$

Os deslocamentos representados na distribuição de isolinhas das Fig. 5.51 e Fig. 5.52 e nos gráficos das Fig. 5.53 e Fig. 5.54, foram obtidas para valores de  $p_1 = 2000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

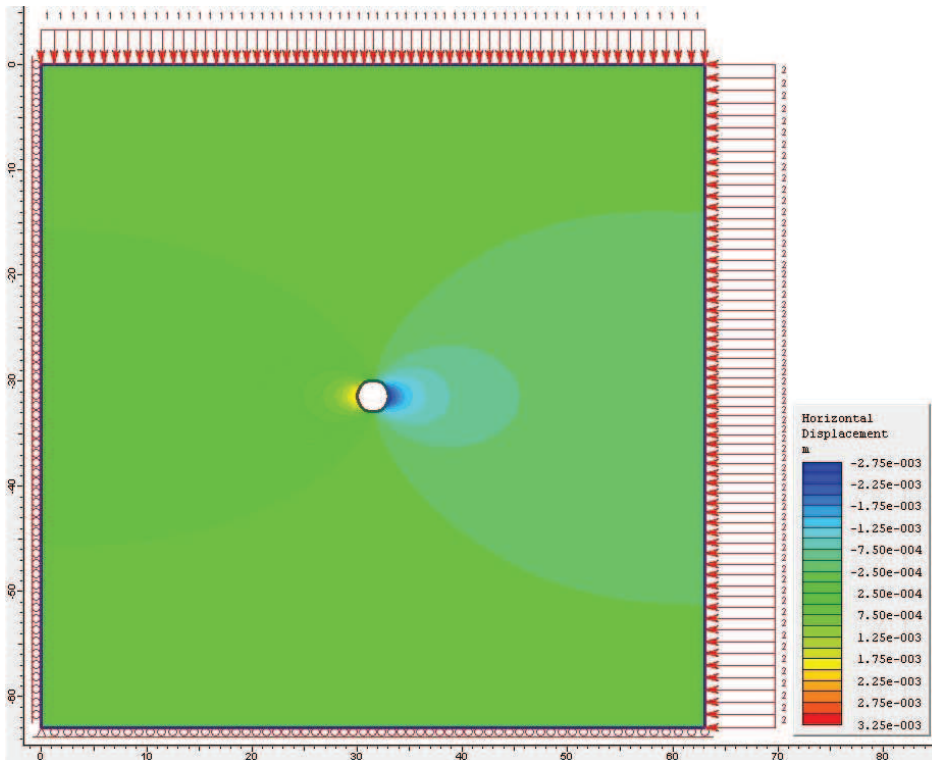


Fig. 5.51 - Distribuição de deslocamentos  $u_x$ , para  $k=2$  com modelo do estado plano de deformação

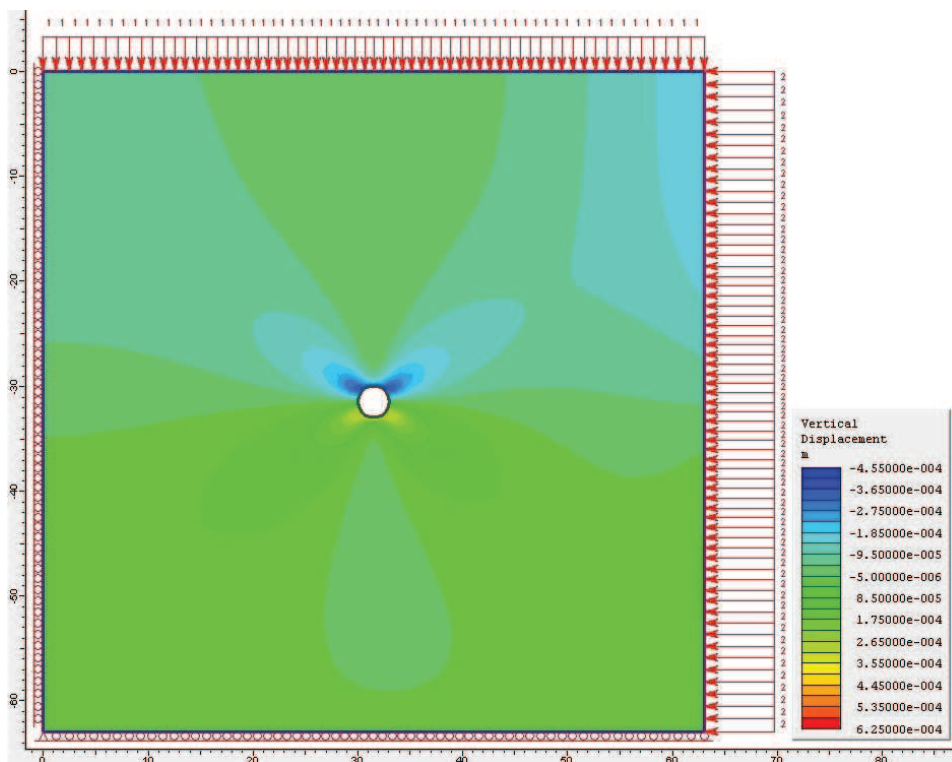


Fig. 5.52 - Distribuição de deslocamentos  $u_y$ , para  $k=2$  com modelo do estado plano de deformação

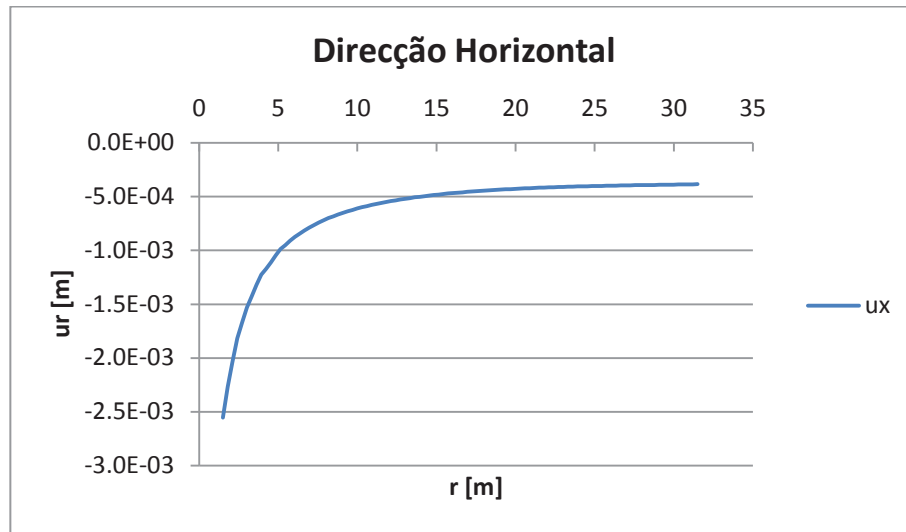


Fig. 5.53 - Gráfico de deslocamentos  $u_x$  na direcção horizontal, para  $k=2$  com modelo do estado plano de deformação

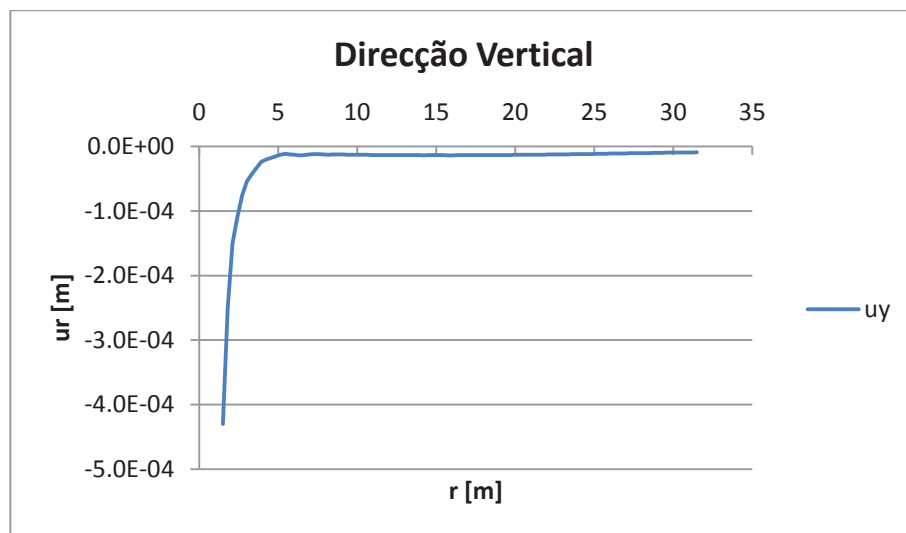


Fig. 5.54 - Gráfico de deslocamentos  $u_y$  na direcção vertical, para  $k=2$  com modelo do estado plano de deformação

#### 5.2.2.4 Deslocamentos radiais ( $u_x$ e $u_y$ ) nas direcções, horizontal e vertical, para $k=3$

Os deslocamentos representados na distribuição de isolinhas das Fig. 5.55 e Fig. 5.56 e nos gráficos das Fig. 5.57 e Fig. 5.58, foram obtidas para valores de  $p_1 = 3000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

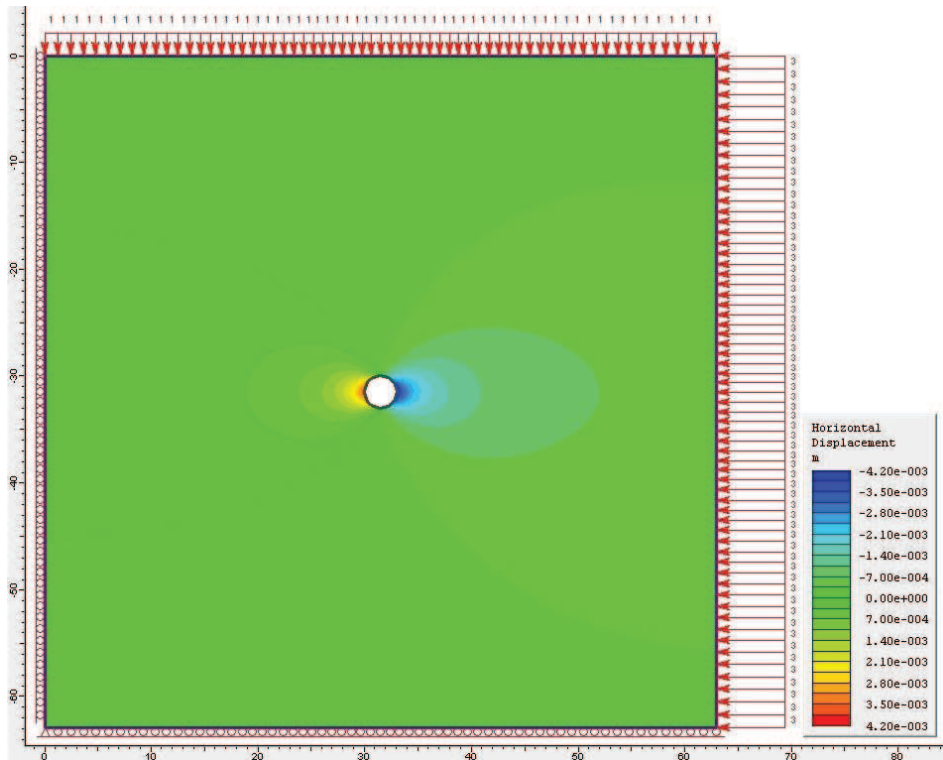


Fig. 5.55 - Distribuição de deslocamentos  $u_x$ , para  $k=3$  com modelo do estado plano de deformação

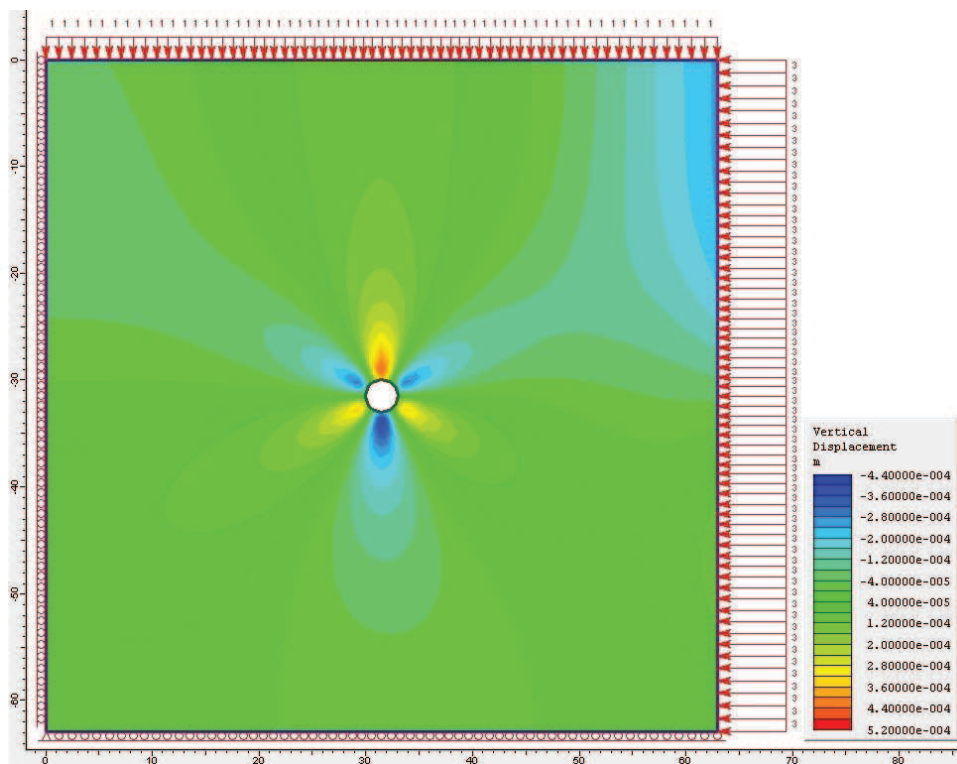


Fig. 5.56 - Distribuição de deslocamentos  $u_y$ , para  $k=3$  com modelo do estado plano de deformação

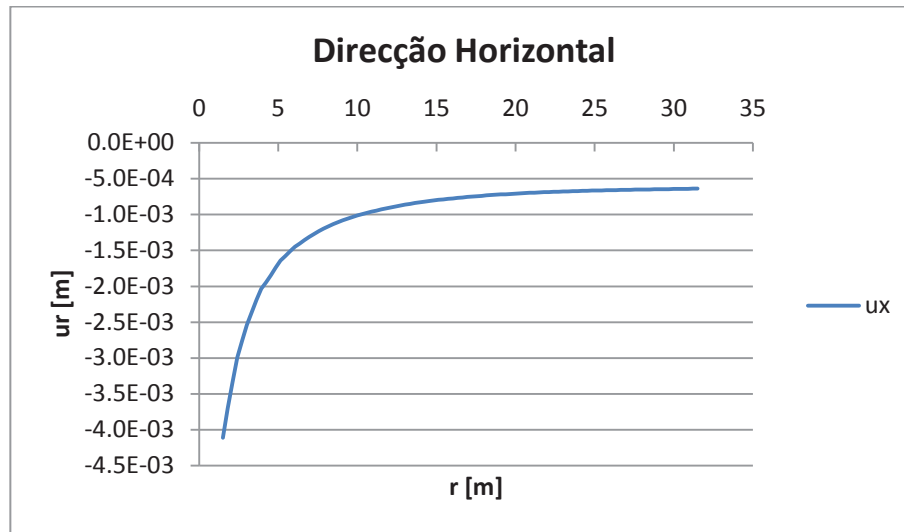


Fig. 5.57 - Gráfico de deslocamentos  $u_x$  na direcção horizontal, para  $k=3$  com modelo do estado plano de deformação

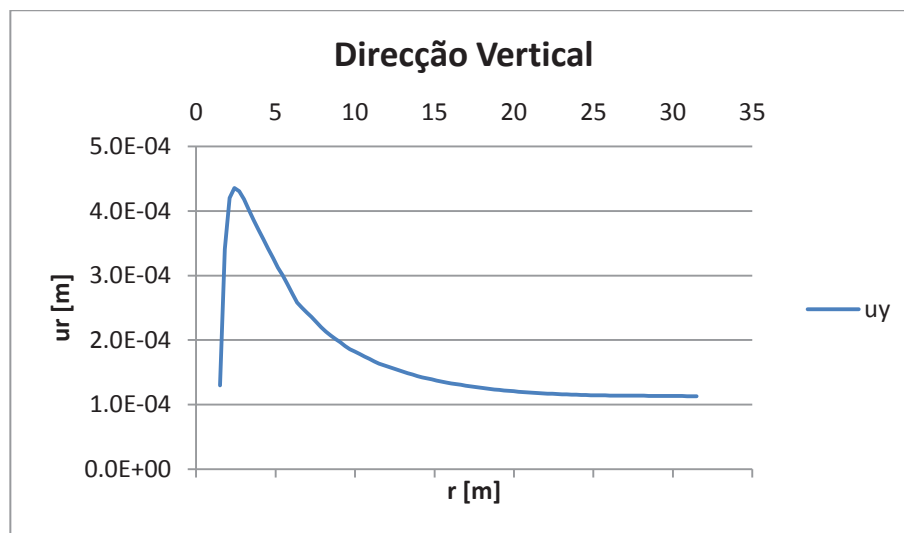


Fig. 5.58 - Gráfico de deslocamentos  $u_y$  na direcção vertical, para  $k=3$  com modelo do estado plano de deformação

#### 5.2.2.5 Deslocamentos radiais ( $u_x$ e $u_y$ ) nas direcções, horizontal e vertical, para $k=4$

Os deslocamentos representados na distribuição de isolinhas das Fig. 5.59 e Fig. 5.60 e nos gráficos das Fig. 5.61 e Fig. 5.62, foram obtidas para valores de  $p_1 = 4000 \text{ kPa}$  e  $p_2 = 1000 \text{ kPa}$ .

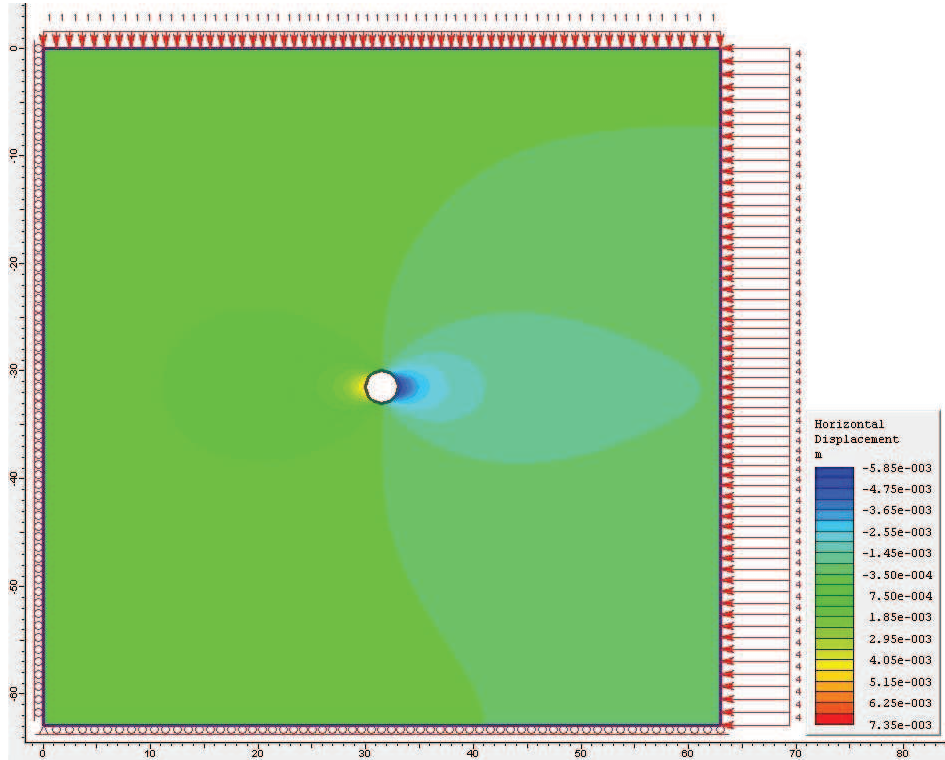


Fig. 5.59 - Distribuição de deslocamentos  $u_x$ , para  $k=4$  com modelo do estado plano de deformação

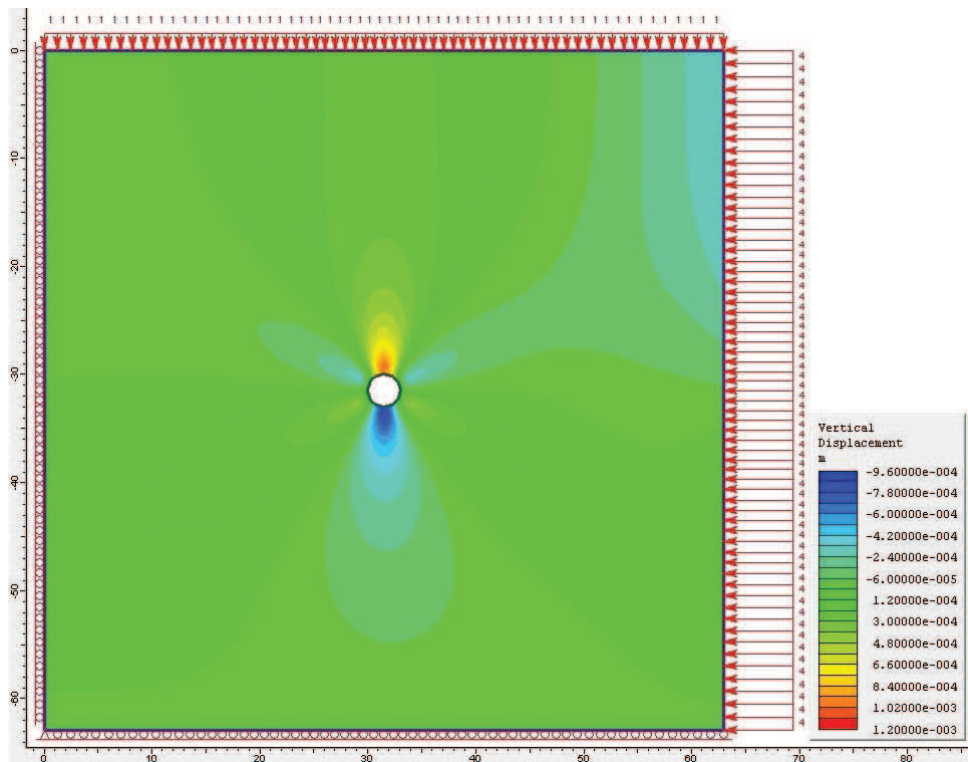


Fig. 5.60 - Distribuição de deslocamentos  $u_y$ , para  $k=4$  com modelo do estado plano de deformação



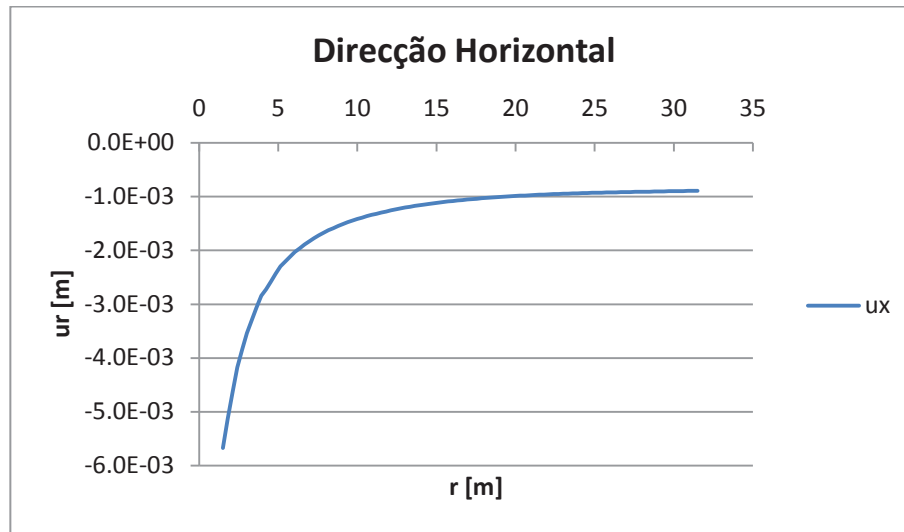


Fig. 5.61 - Gráfico de deslocamentos  $u_x$  na direcção horizontal, para  $k=4$  com modelo do estado plano de deformação

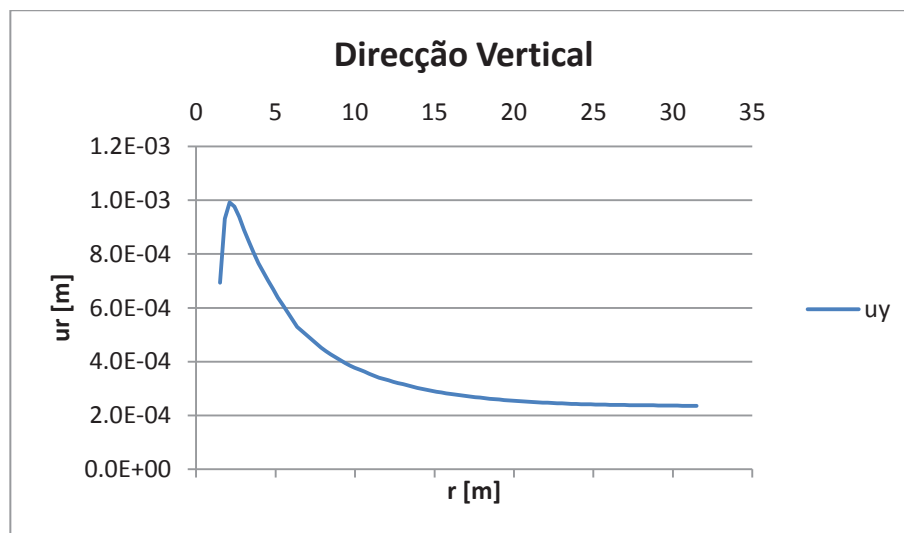


Fig. 5.62 - Gráfico de deslocamentos  $u_y$  na direcção vertical, para  $k=4$  com modelo do estado plano de deformação

### 5.2.3 Considerações acerca dos resultados obtidos pelo modelo no estado plano de deformação

De um modo geral, pode-se afirmar que a tendência dos deslocamentos obtidos com o modelo do estado plano de deformação é em tudo semelhante à tendência dos deslocamentos obtidos pela solução de *Kirsch*. Visto que têm a tendência de se anular, à medida que aumenta a distância à abertura, possuindo um decréscimo mais acentuado para distâncias de cerca de 5m do centro do túnel.

### 5.3 Resultados obtidos pela modelação axissimétrica com cálculo elástico

A modelação do problema com o sistema axissimétrico foi efectuada de acordo com a metodologia descrita no ponto 4.4.3. Para o cálculo elástico foram escavadas 4 secções de 2,5m, para obtenção de resultados com uma distância escavada considerável, a partir do ponto de entrada.

Uma das limitações sentidas, para o cálculo axissimétrico, reside no facto de não ser possível variar a relação de tensões perpendiculares ao eixo do túnel, tal como foi efectuada para o modelo no estado plano de deformação. Esta limitação, surge devido ao carregamento ser modelado em torno do eixo de revolução do túnel, pelo que as tensões radiais vão ser sempre as mesmas. Portanto, as tensões, vertical e a horizontal são sempre iguais, facto pelo qual se obtém sempre um  $k = \frac{p_1}{p_2}$  unitário, pois na realidade não existe  $p_1$  e  $p_2$ , apenas existe um carregamento na direcção perpendicular ao eixo do túnel.

Existe um carregamento na direcção paralela ao eixo do túnel, que poderia ser modificado, mas neste caso não interfere significativamente nos resultados, uma vez que as tensões em análise são as tensões obtidas no plano transversal ao desenvolvimento do túnel.

Neste ponto de análise serão obtidos deslocamentos na direcção perpendicular ao desenvolvimento do túnel, que podem ser comparados com os resultados obtidos nos pontos anteriores em que a relação entre as tensões vertical e horizontal é igual à unidade ( $k = 1$ ) e  $p = 1000kPa$

São ainda obtidos deslocamentos na parede do túnel, no sentido de convergência para o seu interior, em relação à distância à frente de escavação.

#### 5.3.1 Deslocamentos no plano transversal ao eixo do túnel

Calculado o modelo, com recurso à função “interpret”, é possível observar uma distribuição gráfica de determinadas varáveis, de entre as quais os deslocamentos. De modo a obter deslocamentos num plano perpendicular ao eixo do túnel são recolhidas as informações num alinhamento definido como horizontal. Como se pode observar pela linha de recolha de informação com o número (1), na Fig. 5.63.

De modo a obter deslocamentos comparáveis com a solução no estado plano de deformação, apenas podem ser considerados os deslocamentos no sentido radial. Uma vez que o programa apenas disponibiliza a informação de deslocamentos horizontais, verticais ou totais. Correspondendo os deslocamentos horizontais no modelo axissimétrico, aos deslocamentos radiais e os verticais no modelo axissimétrico, aos deslocamentos no sentido do desenvolvimento do túnel. Não sendo os segundos relevantes para esta comparação.

Sendo assim a Fig. 5.63, representa a distribuição dos deslocamentos por zonas de iguais valores para a fase de escavação da última secção.

Uma vez que o estado de tensão foi imposto ao maciço, por meio de cargas distribuídas, correspondendo à primeira fase de modelação, todo o maciço experimentou deslocamentos decorrentes desta acção. Como tal, para se obterem os deslocamentos efectivos da última fase em análise, é necessário subtrair os deslocamentos provocados pela indução do estado de tensão.

Foram então obtidos os deslocamentos no sentido radial, para a primeira e última fase, ao longo do alinhamento horizontal, desde a superfície escavada a até à fronteira do maciço, tendo-se obtido os deslocamentos efectivos com o recurso a folhas de cálculo.

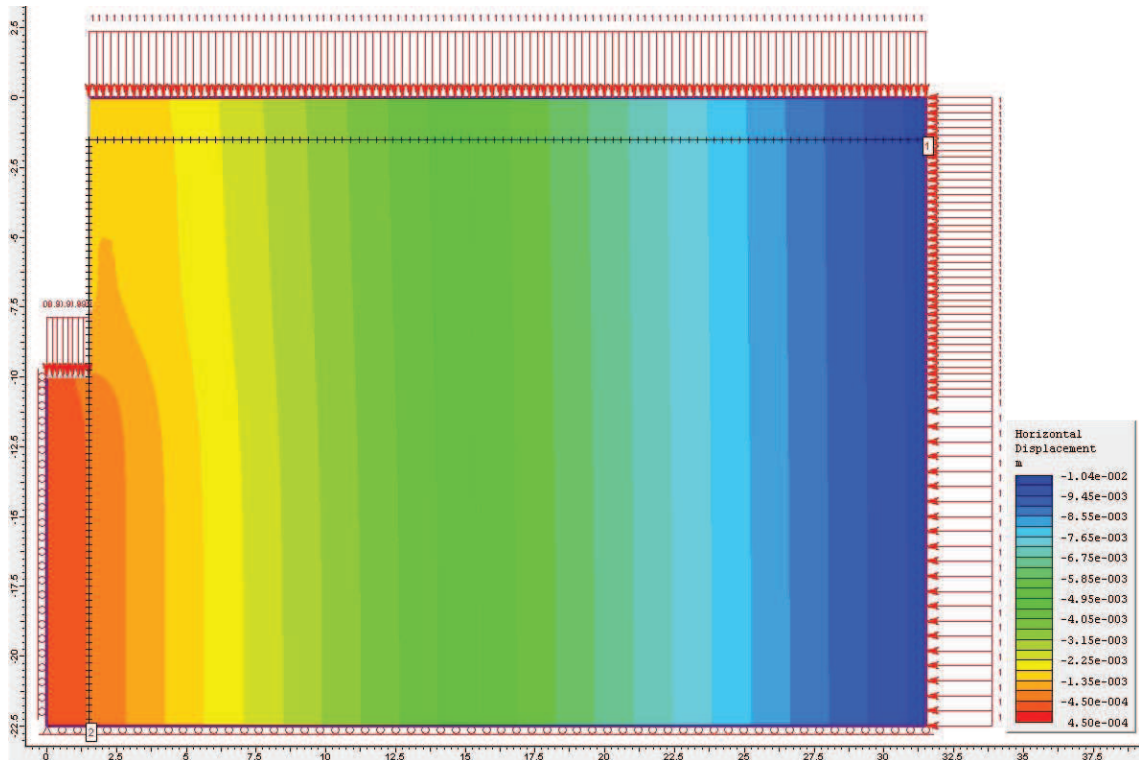


Fig. 5.63 - Distribuição de deslocamentos na direcção radial, para o modelo axissimétrico elástico

O alinhamento horizontal considerado encontra-se à distância de 1,5m da fronteira do maciço, por forma a evitar a recolha de dados com perturbações provocadas pela indução do estado de tensão, junto desta fronteira.

O gráfico da Fig. 5.64, apresenta os resultados dos deslocamentos efectivos radiais, ao longo do alinhamento horizontal (1), considerado.

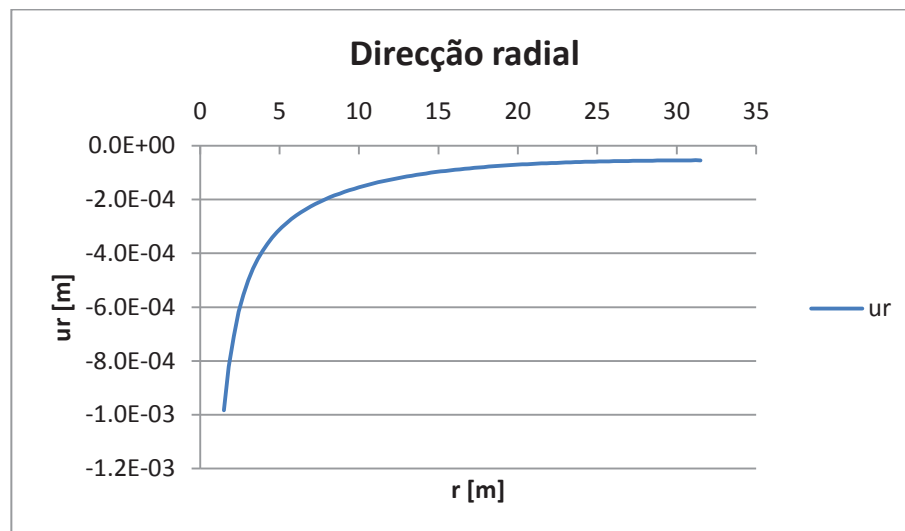


Fig. 5.64 - Deslocamentos radiais no plano transversal ao eixo do túnel, para o modelo axissimétrico elástico

Os resultados dos deslocamentos presentes no gráfico, são comparáveis com os resultados dos deslocamentos apresentados nos gráficos das Fig. 5.49 e Fig. 5.50, obtidos no estado plano de deformação. Pelo que se pode dizer que os deslocamentos seguem a mesma tendência, sendo da mesma ordem grandeza e tendendo a anularem-se com o afastamento do centro do túnel.

### 5.3.2 Deslocamentos de convergência ao longo da superfície do túnel

De modo a obter os resultados dos deslocamentos na direcção radial, no sentido do interior do túnel, ao longo da sua superfície, foi utilizada uma linha de recolha de informação ao longo da fronteira de escavação, prolongando-se para o interior do maciço. Esta linha pode ser observada na Fig. 5.63, como sendo a linha (2).

Tal como foi efectuado para a recolha de dados na secção transversal, esta linha inicia-se a 1,5m da fronteira do terreno, de forma a evitar as perturbações sentidas nesta fronteira devido à aplicação do estado de tensão.

Como a indução do estado de tensão provoca deslocamentos na sua fase de aplicação, de forma a obter os deslocamentos efectivos na superfície do túnel, os deslocamentos iniciais são subtraídos aos deslocamentos da última fase de escavação, fase em que são recolhidos os resultados.

Os deslocamentos de convergência, observados na análise ocorrem em toda a secção circular do túnel, visto que se trata de uma modelação axissimétrica.

No gráfico da Fig. 5.65, podem-se observar os deslocamentos efectivos radiais no sentido do interior do túnel, em função da distância à frente de escavação. A referência é secção da frente de escavação, sendo o sentido positivo da distância, o sentido da progressão da escavação

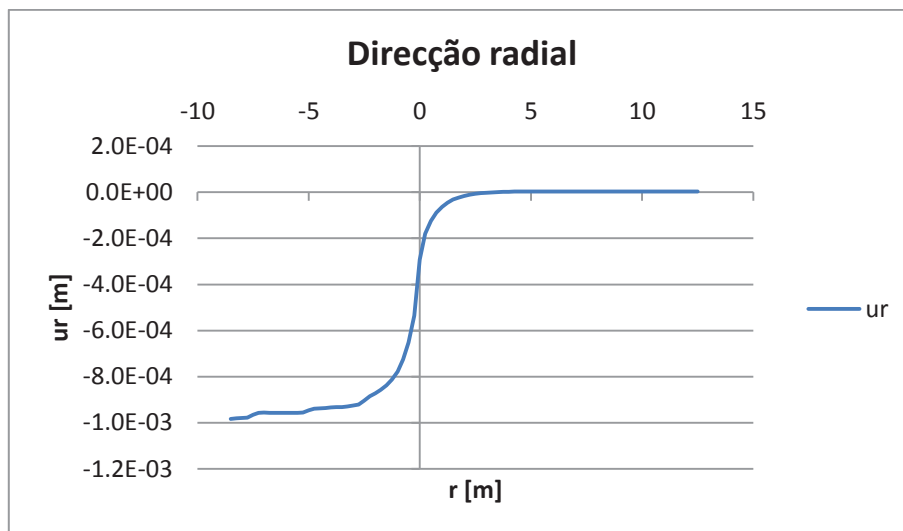


Fig. 5.65 - Deslocamentos no alinhamento da parede do túnel, na direcção radial, para o modelo axissimétrico elástico

Como se pode observar, para a secção de controlo coincidente com a frente de escavação, os deslocamentos máximos ocorrem para as secções de entrada, reduzindo-se progressivamente até a um valor nulo, numa secção que ainda não se encontra escavada. Pelo que a escavação afecta também as

secções do maciço a jusante. Tendendo os deslocamentos a montante da frente de escavação para o valor máximo, à medida que se avança na escavação.

Por forma a normalizar os resultados obtidos, obteve-se um gráfico da relação entre o deslocamento da distância à frente e o deslocamento máximo, em função da relação entre distância à frente e o diâmetro do túnel,  $(u_r/u_f)=f(r/D)$ , em que  $u_f$  é o deslocamento final (máximo) para o qual tendem as secções a ser escavadas e  $D$  é o diâmetro do túnel. O gráfico pode ser observado na Fig. 5.66.



Fig. 5.66 - Deslocamentos radiais normalizados em função da relação da distância à frente e do diâmetro, para o modelo axissimétrico elástico

Pela análise do gráfico, pode-se afirmar que os deslocamentos são máximos nas secções de entrada, tendendo a anularem-se a partir das secções que distam entre 1 a 2 diâmetros da frente de escavação, no sentido da progressão da escavação.

#### 5.4 Resultados obtidos pela modelação axissimétrica com cálculo plástico

A modelação do problema com a análise axissimétrica com cálculo plástico, decorreu como o descrito no ponto 4.4.3.3, tendo sido escavadas secções de 0,5m por etapa.

Como foi referido, o suporte inserido aquando da escavação do túnel é constituído por um material que simula o tubo de betão, a ser empurrado, com as características definidas. Sendo introduzido ao mesmo tempo que o suporte um outro material que simula uma espécie de uma lama bentonítica com o objectivo de reduzir o atrito entre o tubo e o maciço envolvente.

No que respeita ao empurre, este é simulado quando já estão instaladas duas secções de tubo, com o comprimento total de 5m. Sendo os resultados obtidos depois da interacção dessa força com o tubo. O empurre é simulado com incrementos de carga, aplicados gradualmente na secção do tubo modelada, até um valor limite. Este empurre é conseguido com a aplicação de uma carga distribuída pela espessura do tubo, que se reflecte numa força uniformemente distribuída por toda a secção circular do tubo. O que de facto acontece na realidade, pois o sistema de empurre transmite a força proveniente dos macacos à secção a instalar, por intermédio de um sistema com um anel especialmente desenvolvido, para que a transmissão de esforço axial seja uniformemente distribuída pela espessura do tubo.

O incremento de carga associado ao empurre é dado pela carga crescente, de  $2\text{MN/m}^2$ ,  $5\text{MN/m}^2$ ,  $10\text{MN/m}^2$ ,  $20\text{MN/m}^2$ ,  $30\text{MN/m}^2$ ,  $40\text{MN/m}^2$  até um máximo de  $50\text{MN/m}^2$ .

Dado o faseamento construtivo, desde a etapa de aplicação do estado de tensão, passando pela introdução dos materiais tubo de betão e lama, pela escavação nas etapas equivalentes à introdução de duas secções de 2,5m, até se aplicarem os 7 incrementos de carga, o modelo experimentou 28 etapas de cálculo.

Nas figuras Fig. 5.67 a Fig. 5.70, é mostrada a envolvente de tensões nas direcções principais máxima e mínima, para as imediações da zona de escavação, para as etapas, antes do início do empurre, e final do empurre.

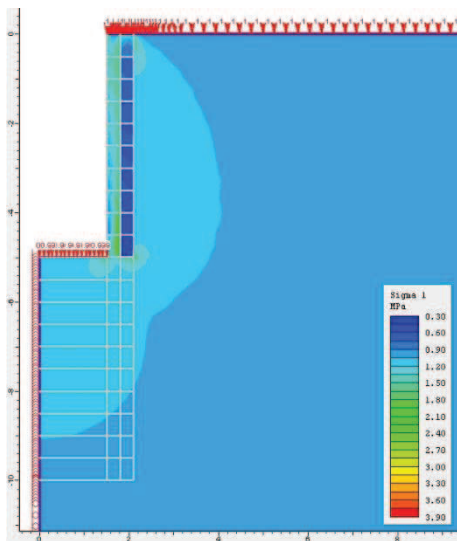


Fig. 5.67 - Distribuição de tensões principais máximas, antes do empurre, para o modelo axissimétrico plástico

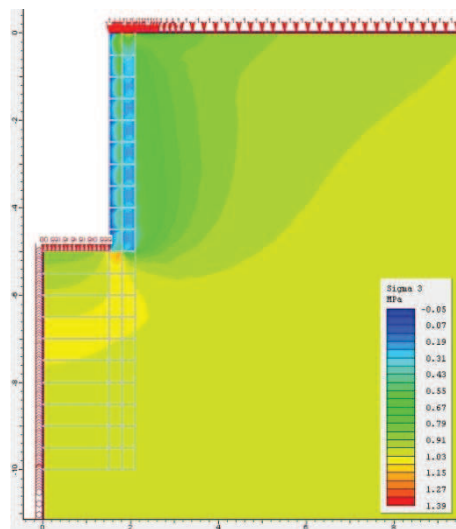


Fig. 5.68 - Distribuição de tensões principais mínimas, antes do empurre, para o modelo axissimétrico plástico

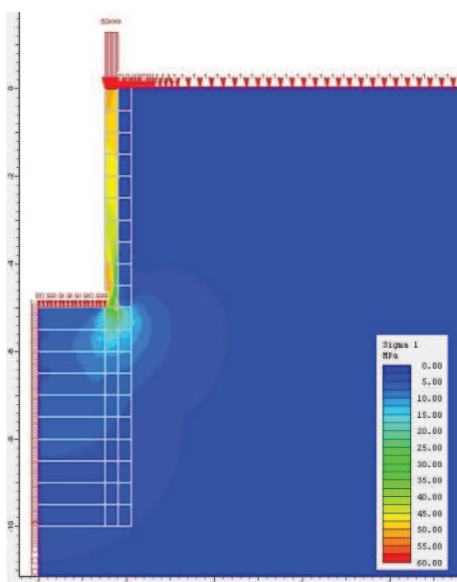


Fig. 5.69 - Distribuição de tensões principais máximas, no final do empurre, para o modelo axissimétrico plástico

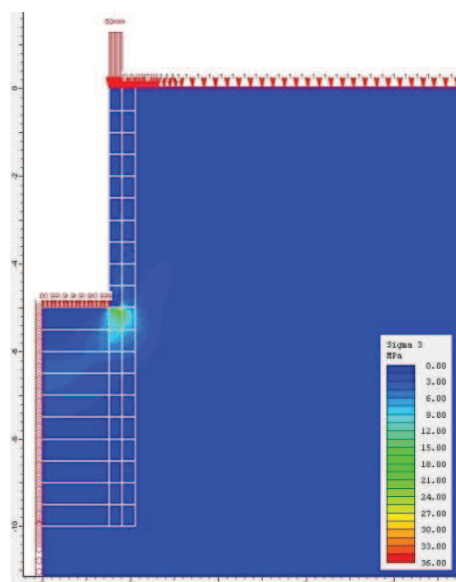


Fig. 5.70 - Distribuição de tensões principais mínimas, no final do empurre, para o modelo axissimétrico plástico



#### 5.4.1 Deslocamentos na extremidade do tubo de betão

Para as carga consideradas no empurre podem ser obtidos os deslocamentos no sentido da progressão da escavação, provocados por essas cargas, no tubo de betão a ser empurrado. Para tal efeito considera-se uma linha de recolha de informação, na secção final do tubo empurrado, ao longo da sua espessura, retirando-se daí os resultados dos deslocamentos verticais. A linha de recolha de informação pode ser observada na Fig. 5.71, representada com o número (1).

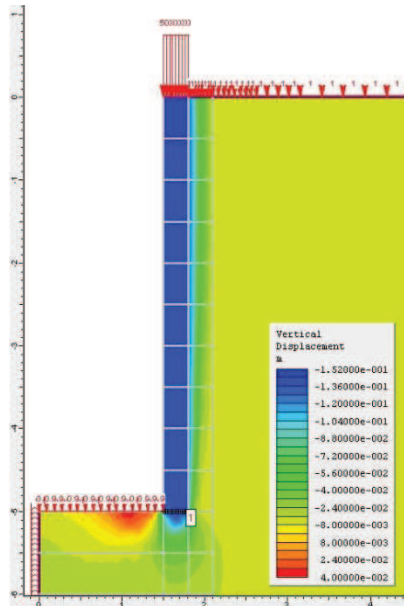


Fig. 5.71 - Pormenor da zona de escavação com a linha de recolha de resultados, para os deslocamentos do tubo de betão com as cargas de empurre, para o modelo axissimétrico plástico

Em seguida são apresentados os deslocamentos obtidos para cada carga de empurre, ao nível da face do primeiro tubo de betão a ser empurrado. Estes deslocamentos apresentados já se encontram subtraídos dos deslocamentos provocados pela incorporação do estado de tensão e pelas fases de escavação, sendo os deslocamentos efectivos para cada fase de empurre.

Como se pode observar pelo gráfico da Fig. 5.72, as primeiras forças não provocam movimentos significativos no tubo, parecendo os deslocamentos provocados pelas 3 primeiras forças quase sobrepostos. As forças de maior magnitude, já provocam deslocamentos muito significativos na secção do tubo, uma vez que as forças de 30 MN/m<sup>2</sup> e 40 MN/m<sup>2</sup> provocam deslocamentos da ordem dos decímetros e a força de 50 MN/m, chega a provocar deslocamentos da ordem dos decímetros.

Para uma interpretação mais fácil dos deslocamentos em função da força de empurre é apresentado o gráfico da Fig. 5.73, que apresenta o deslocamento pontual em função da carga de empurre, sendo o deslocamento pontual, o deslocamento médio dos deslocamentos obtidos para a espessura do tubo.

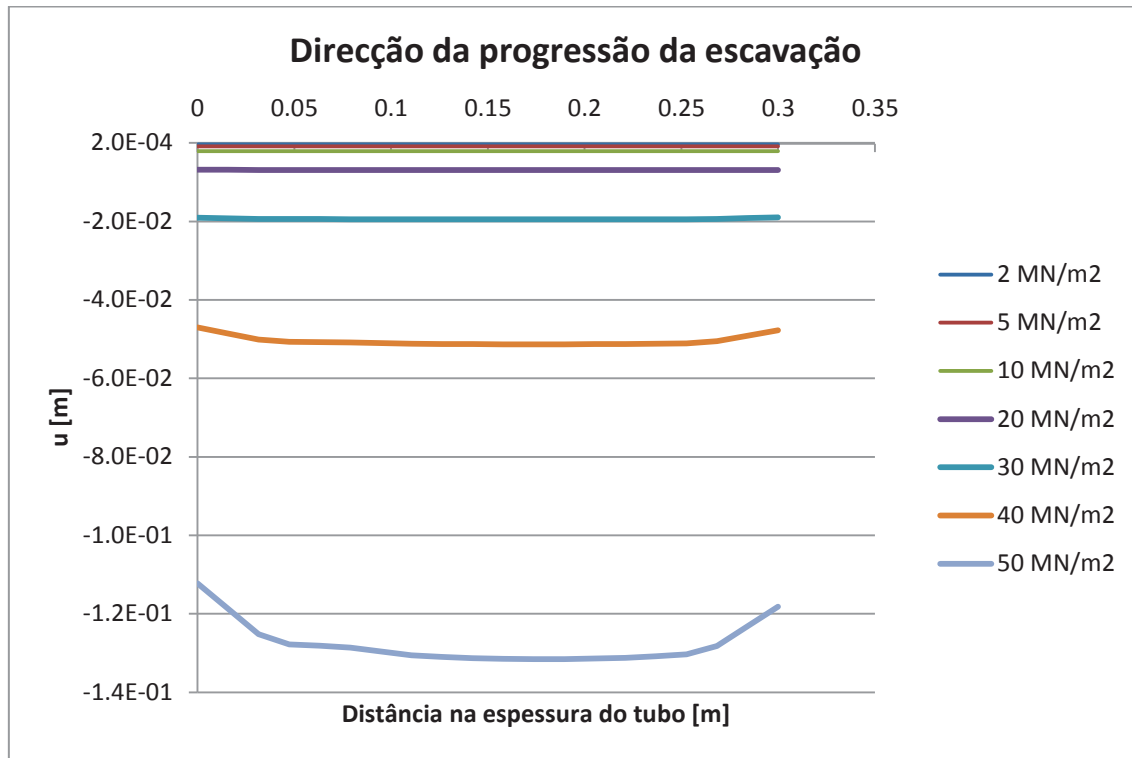


Fig. 5.72 - Deslocamento da face do tubo de betão no sentido do empurre, face às forças de empurre, para o modelo axissimétrico plástico

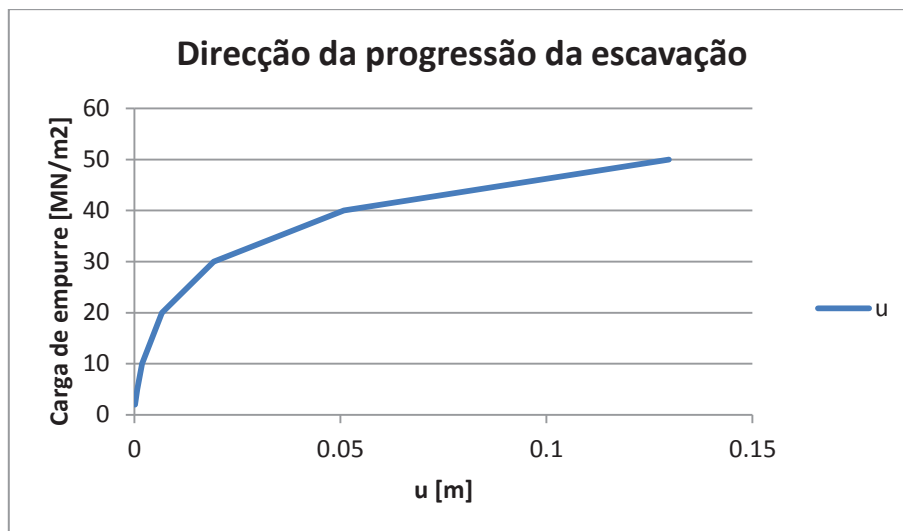


Fig. 5.73 - Deslocamento absoluto, pontual médio do tubo, no sentido do empurre, em função da carga de empurre, para o modelo axissimétrico plástico

#### 5.4.2 Resistência friccional entre o tubo e o maciço, promovida pelo empurre

Ao empurrar um segmento de betão, ou até mesmo um conjunto de segmentos de betão ao longo de um túnel escavado num maciço de solo competente, a criação de esforços de resistência ao empurre de cariz friccional, pode-se imaginar inoportável. De forma a reduzir esse atrito ente a estrutura a

empurrar e o maciço presente no local são injectados fluidos no espaço intersticial entre os dois, possuindo este fluido, propriedades mais ou menos viscosas, sendo injectado com mais ou menos pressão, conforme a resistência ao corte mobilizada.

Como foi referido, no modelo, este material foi modelado numa camada de 0,30m adjacente à faixa que simula o tubo de betão, com as propriedades mencionadas, desenvolvendo-se em torno de toda a superfície do tubo, uma vez que o modelo é calculado axissimetricamente.

Por forma a obter as forças de corte geradas entre o tubo de betão e o maciço, com a introdução desta lama, foi criada uma linha de recolha de informação ao longo deste material, mais próxima do tubo de betão do que do maciço, seleccionando o parâmetro de resultados, tensão de corte. A linha de recolha de informação pode ser observada na Fig. 5.74, identificada com o número (1).

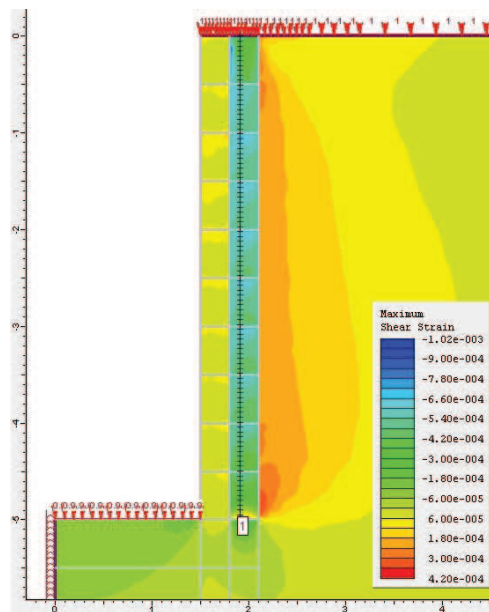


Fig. 5.74 - Distribuição das deformações máximas de corte nas imediações da zona de escavação, no momento antes do empurre, para o modelo axissimétrico plástico

De modo análogo ao procedido para os deslocamentos na extremidade do tubo são obtidos os valores da tensão de corte ao longo do segmento de controlo considerado, para cada fase de empurre, de modo a obter as tensões de corte, que a superfície do tubo experimenta.

O gráfico da Fig. 5.75, mostra os valores da tensão de corte obtida para cada carregamento ao longo da faixa adjacente à superfície do tubo de betão.

Como se pode observar, as tensões de corte aumentam significativamente com o aumento da força de empurre, embora dos 10 aos 40MN/m<sup>2</sup>, as tensões mantém-se perto dos 400KPa, aumentando abruptamente para a cara de empurre de 50MN/m<sup>2</sup>.

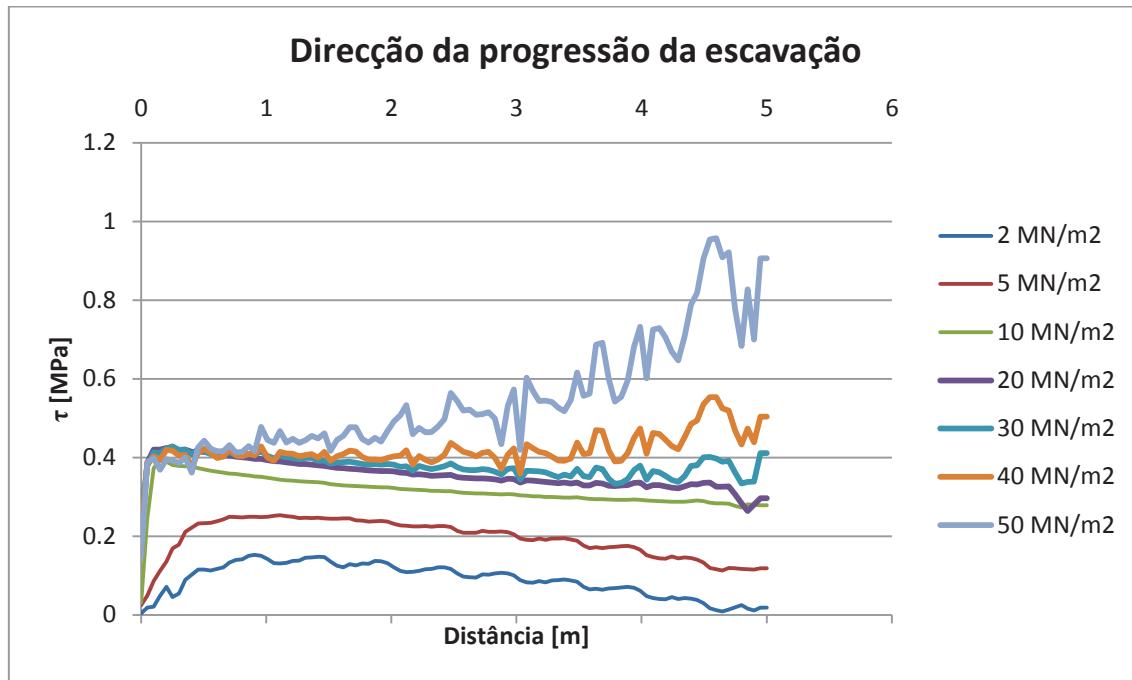


Fig. 5.75 - Tensões de corte mobilizadas ao longo da superfície do tubo, em função dos diversos carregamentos, para o modelo axissimétrico plástico

# 6

## CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões gerais

O principal objectivo deste objectivo é o estudo dos aspectos geotécnicos para o dimensionamento de um túnel com recurso à solução de tuneladora com anéis de betão empurrados, tendo por base alguns dados de um exutor construído com a mesma técnica.

Dada a complexidade do assunto abordado, foi contextualizada a técnica com uma descrição detalhada dos processos necessários à sua execução, bem como das componentes que compõem as várias zonas, nas quais se pode dividir o trabalho de execução de um túnel com anéis empurrados de betão.

Por forma a avaliar os aspectos geotécnicos de um túnel executado com *pipe jacking*, foi proposta uma análise baseada num modelo de elementos finitos, que pudesse ser calculado numericamente. Esta análise proposta, veio a ser executada com o programa que tem por base o método dos elementos finitos, Phase<sup>2</sup>.

Como não existiam à disposição modelos que simulassem uma situação de empurre de anéis de betão, foi criado um modelo no programa de cálculo de modo a simular tal situação, necessitando de ser validado por comparação com uma solução teórica. No domínio elástico, a abertura de um túnel num maciço competente, pode ser simulada pela solução de *Kirsch*, que serviu de validação ao modelo realizado no estado plano de deformação, criado no Phase<sup>2</sup>.

Os resultados obtidos para a análise elástica, quando comparados com os resultados obtidos para a solução teórica, fornecem dados muito credíveis, uma vez que quando comparados quer em termos de tensões quer em termos de deslocamentos, conseguem chegar a valores muito próximos e em alguns casos quase iguais.

Visto que a situação de empurre não era possível ser modelada no estado plano de deformação, optou-se por simular um cenário que na realidade ocorre em 3 dimensões, num modelo a duas dimensões, tirando partido da funcionalidade do modelo axissimétrico do programa Phase<sup>2</sup>. Permitindo a modelação de um cenário construtivo, em torno de um eixo de revolução.

Com a aproximação das características e propriedades obtidas no exutor de Matosinhos ao modelo criado conseguiram-se estimar parâmetros para o dimensionamento dos tubos e dos mecanismos de empurre dos mesmos, pela obtenção de deslocamentos e tensões de corte, resultantes do atrito estrutura/solo, em função da força de empurre empregue na execução. Devido às limitações e simplificações acarretadas pelo modelo axissimétrico não foi possível a obtenção de um maior número

de parâmetros para o dimensionamento, uma vez que o modelo axissimétrico aplica a mesma tensão radialmente em torno de todo o modelo simulando apenas a situação de um túnel profundo.

## **6.2 Desenvolvimentos futuros**

Dadas as limitações da realização do trabalho em tempo útil e as limitações de uma análise a duas dimensões, são apresentadas algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

- Elaboração de um modelo em 3 dimensões, com recurso a um programa de cálculo para o efeito;
- Efectuar uma análise paramétrica, obtendo resultados para diferentes tipo de materiais, diferentes secções, diferentes tipos de maciços e diferentes comprimentos de empurre;
- Incorporar o conceito de estação intermédia de empurre, de modo a avaliar e/ou otimizar um maior comprimento de empurre sem recurso a abertura de novos poços de ataque no alinhamento do túnel.



## BIBLIOGRAFIA

- Akkerman. 2011. Akkerman Inc. 2011 [cited 01/07 2011]. Available from <http://www.akkerman.com/products-conventional-tbm.php>.
- ASTT. 2012. *Australasian Society for Trenchless Technology* 2010 [cited 18/06 2012]. Available from [http://www.astt.com.au/trenchless\\_technology/new\\_installations/](http://www.astt.com.au/trenchless_technology/new_installations/).
- Bradshaw. 2011. *Bradshaw Construction Corporation* 2011 [cited 17/07 2011]. Available from <http://www.bradshawcorp.com/>.
- BSEN-1916. 2002. Concrete pipes and fittings, unreinforced, steel fibre and reinforced. edited by B. Standards.
- BuchanConcreteSolutions. 2011. 2011 [cited 18/06 2011]. Available from <http://www.buchanconcrete.com/>.
- Butler, David, and John W. Davies. 2011. *Urban drainage*. 3rd ed. London ; New York: Spon Press.
- Decreto Regulamentar n.º 23/95. edited by M. d. O. P. T. e. Comunicações. Lisboa: Diário da República nº 194/95 - I Série-B.
- DIN 4124. 2002-10. "Construção de poços e valas".
- egeplast. 2011. *egeplast - Plastic Pipes for Trenchless Installation* 2011 [cited 23/06 2011]. Available from <http://www.egeplast.de/manager.php?m=3&catID=4&clickID=3660&subID=3669&targetID=966>.
- Exponent. 2011. *Exponent, Engineering an Scientific Consulting* 2010 [cited 23/06 2011]. Available from <http://www.exponent.com/Micro-Tunneling-Using-Vitrified-Clay-Pipe-Los-Angeles-CA/>.
- Ferguson, Bruce K. 1998. *Introduction to stormwater : concept, purpose, design*. New York: Wiley.
- Fernandes, M.M. 2006. *Sebenta de Mecânica dos solos* Vol. II: FEUP.
- Goodman, Richard E. 1989. *Introduction to Rock Mechanics* (2nd Edition). John Wiley & Sons.
- Herrenknecht. 2011. *Herrenknecht AG* 2011 [cited 29/07 2011]. Available from <http://www.herrenknecht.com/process-technology/support-techniques/pipe-jacking.html>.
- Hidrossolo, S.A. 2011. 2006 [cited 18/06 2011]. Available from <http://www.hidrossolo.pt/>.
- HOBAS. 2010. *Jacking Pipes*. edited by H. E. GmbH.
- HOBAS. 2011. *HOBAS Engineering GmbH* 2011 [cited 23/06 2011]. Available from <http://www.hobas.com/projects/projects-details/article/grp-double-pipes-for-the-city-of-rome-it/2.html>.
- Horton, R.E. 1940. An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. *Proceedings of Soil Science Society of America* 5:399-417.
- Huxted. 2011. *Huxted Tunneling* 2011 [cited 17/07 2011]. Available from [http://www.huxtedtunneling.com/microtunneling\\_definition\\_history\\_equipment.shtml](http://www.huxtedtunneling.com/microtunneling_definition_history_equipment.shtml).
- Iseki. 2011. *Iseki Microtunnelling* 2009 [cited 12/07 2011]. Available from <http://www.isekimicro.com/jacking.html>.

- J & J Boring, Inc. 2011. 2011 [cited 17/07 2011]. Available from <http://www.jjboring.com/>.
- Kana Pipeline, Inc. 2011. 2011 [cited 16/06 2011]. Available from <http://www.kanapipeline.com/images/open-trench.html>.
- Kidd, C.H.R. , and M.J. Lowring. 1979. The Walling Urban Sub-catchment Model. In *IoH Report No. 60*: Institute of Hydrology.
- KUBOTA. 2007. *Ductile Iron Pipeline - Design Manual*. Edited by K. Corporation. Tokyo.
- Layne. 2011. *Layne GeoConstruction* 2011 [cited 17/07 2011]. Available from [http://www.laynegeo.com/jetgrouting\\_technical3.html](http://www.laynegeo.com/jetgrouting_technical3.html).
- Meyer. 2011. *Meyer - POLYCRETE® The Optimum Way* 2011 [cited 23/06 2011]. Available from [http://www.meyer-polycrete.com/downloads/pdf/VT\\_GB.pdf](http://www.meyer-polycrete.com/downloads/pdf/VT_GB.pdf).
- Permalok. 2011. *Permalok - The Interlocking Pipe Joint System* 2011 [cited 23/06 2011]. Available from [http://www.permalok.com/projects\\_index.html](http://www.permalok.com/projects_index.html).
- PJA. 1995. *An Introduction to Pipe Jacking and Microtunneling Design*. London, U.K.: Pipe Jacking Association.
- PPS. 2011. *Politering Precision Systems* 2011 [cited 14/07 2011]. Available from [http://www.tunnelbuilder.com/suppliers/PPS\\_profile/index.html](http://www.tunnelbuilder.com/suppliers/PPS_profile/index.html).
- Read, G.F. 2004. Sewers: replacement and new construction.96-97.
- Roe, M.R. 1995. *Guide to Best Practice for the Installation of Pipe Jacks and Microtunnels*. London, U.K.: Pipe Jacking Association
- ServicesFirstLimited. 2011. 2011 [cited 19/06 2011]. Available from <http://www.servicesfirstltd.co.uk/drainage/diversions/sewer-diversion/>.
- SubterraneaBritannica. 2011. *Subterranea Britannica* 2008 [cited 16/06 2011]. Available from [http://www.subbrit.org.uk/sb-sites/sites/b/brighton\\_sewers/index.shtml](http://www.subbrit.org.uk/sb-sites/sites/b/brighton_sewers/index.shtml).
- TalleresSegovia. 2011. *Talleres Segovia, S.L.* 2009 [cited 13/07 2011]. Available from [http://www.talleresegovia.com/eng/segoqui\\_HT\\_2000.php#pic](http://www.talleresegovia.com/eng/segoqui_HT_2000.php#pic).
- TBM. 2011. *TBM: Tunnel Business Magazine* 2011 [cited 17/07 2011]. Available from <http://www.tunnelingonline.com/coverstory/archived/2011/02-coverstory.php>.
- Thomson, J.C. 1993. *Pipejacking and microtunnelling*: Blackie Academic & Professional.
- Topa-Gomes, António, António Gaspar, João Monteiro, and Pedro Malato. 2002. Obras Subterrâneas do Metro do Porto - Apectos Geotécnicos. *8º Congresso Nacional de Geotecnia*:2217-2234.
- TrenchlessWorld. 2011. 2009 [cited 19/06 2011]. Available from <http://www.trenchless-world.com/global-news/national-grid-renews-grundomat-earth-displacement-mole-contract>.
- TT-Group. 2011. *TRACTO-TECHNIK GmbH & Co. KG* 2011 [cited 18/06 2011]. Available from <http://pipelaying.tracto-technik.com/index.cfm?linkArticleID=17>.
- UCM. 2011. *Underground Construction Managers, Inc.* 2011 [cited 23/06 2011]. Available from <http://www.ucm.net/bradshaw.htm>.





# **ANEXOS**





# A1

## Solução de Kirsch - Tensões

K=0

$\theta$	0		$\theta$	0		$\theta$	0	
r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$
1.50	0.00	3000.00	11.75	24.05	1008.55	22.00	6.94	1002.36
1.75	292.38	2177.01	12.00	23.07	1008.18	22.25	6.79	1002.30
2.00	369.14	1755.86	12.25	22.15	1007.83	22.50	6.64	1002.25
2.25	370.37	1518.52	12.50	21.29	1007.51	22.75	6.49	1002.20
2.50	345.60	1374.40	12.75	20.47	1007.21	23.00	6.35	1002.15
2.75	313.50	1281.54	13.00	19.70	1006.92	23.25	6.22	1002.11
3.00	281.25	1218.75	13.25	18.98	1006.65	23.50	6.09	1002.06
3.25	251.46	1174.57	13.50	18.29	1006.40	23.75	5.96	1002.02
3.50	224.91	1142.44	13.75	17.64	1006.16	24.00	5.84	1001.98
3.75	201.60	1118.40	14.00	17.02	1005.94	24.25	5.72	1001.94
4.00	181.27	1099.98	14.25	16.44	1005.72	24.50	5.60	1001.90
4.25	163.58	1085.56	14.50	15.88	1005.52	24.75	5.49	1001.86
4.50	148.15	1074.07	14.75	15.35	1005.33	25.00	5.38	1001.82
4.75	134.67	1064.78	15.00	14.85	1005.15	25.25	5.27	1001.78
5.00	122.85	1057.15	15.25	14.37	1004.98	25.50	5.17	1001.75
5.25	112.45	1050.81	15.50	13.92	1004.81	25.75	5.07	1001.71
5.50	103.27	1045.49	15.75	13.48	1004.66	26.00	4.98	1001.68
5.75	95.13	1040.97	16.00	13.07	1004.51	26.25	4.88	1001.65
6.00	87.89	1037.11	16.25	12.67	1004.37	26.50	4.79	1001.62
6.25	81.42	1033.78	16.50	12.29	1004.23	26.75	4.70	1001.59
6.50	75.63	1030.88	16.75	11.93	1004.11	27.00	4.62	1001.56
6.75	70.42	1028.35	17.00	11.59	1003.98	27.25	4.53	1001.53
7.00	65.71	1026.12	17.25	11.26	1003.87	27.50	4.45	1001.50
7.25	61.46	1024.15	17.50	10.94	1003.75	27.75	4.37	1001.47
7.50	57.60	1022.40	17.75	10.64	1003.65	28.00	4.29	1001.45
7.75	54.09	1020.84	18.00	10.34	1003.54	28.25	4.22	1001.42
8.00	50.88	1019.43	18.25	10.06	1003.45	28.50	4.14	1001.40
8.25	47.95	1018.17	18.50	9.80	1003.35	28.75	4.07	1001.37
8.50	45.26	1017.03	18.75	9.54	1003.26	29.00	4.00	1001.35
8.75	42.79	1015.99	19.00	9.29	1003.17	29.25	3.93	1001.33
9.00	40.51	1015.05	19.25	9.05	1003.09	29.50	3.87	1001.30
9.25	38.41	1014.19	19.50	8.82	1003.01	29.75	3.80	1001.28
9.50	36.46	1013.40	19.75	8.60	1002.93	30.00	3.74	1001.26
9.75	34.66	1012.67	20.00	8.39	1002.86	30.25	3.68	1001.24
10.00	32.99	1012.01	20.25	8.19	1002.79	30.50	3.62	1001.22
10.25	31.44	1011.40	20.50	7.99	1002.72	30.75	3.56	1001.20
10.50	29.99	1010.83	20.75	7.80	1002.65	31.00	3.50	1001.18
10.75	28.64	1010.30	21.00	7.61	1002.59	31.25	3.45	1001.16
11.00	27.37	1009.82	21.25	7.44	1002.53	31.50	3.39	1001.14
11.25	26.19	1009.36	21.50	7.27	1002.47			
11.50	25.09	1008.94	21.75	7.10	1002.41			

$\theta$	90		$\theta$	90		$\theta$	90	
	$r$	$\sigma r$		$\sigma \theta$	$r$		$\sigma r$	$\sigma \theta$
1.50	0.00	-1000.00	11.75	959.66	7.75	22.00	988.41	2.29
1.75	-27.07	-442.32	12.00	961.30	7.45	22.25	988.67	2.24
2.00	68.36	-193.36	12.25	962.85	7.16	22.50	988.92	2.19
2.25	185.19	-74.07	12.50	964.31	6.89	22.75	989.16	2.15
2.50	294.40	-14.40	12.75	965.69	6.63	23.00	989.39	2.10
2.75	388.98	15.98	13.00	966.98	6.39	23.25	989.62	2.06
3.00	468.75	31.25	13.25	968.21	6.16	23.50	989.84	2.01
3.25	535.52	38.44	13.50	969.36	5.94	23.75	990.05	1.97
3.50	591.42	41.23	13.75	970.46	5.74	24.00	990.26	1.93
3.75	638.40	41.60	14.00	971.50	5.54	24.25	990.46	1.89
4.00	678.10	40.65	14.25	972.48	5.36	24.50	990.65	1.85
4.25	711.86	39.01	14.50	973.42	5.18	24.75	990.84	1.82
4.50	740.74	37.04	14.75	974.31	5.01	25.00	991.02	1.78
4.75	765.61	34.94	15.00	975.15	4.85	25.25	991.20	1.75
5.00	787.15	32.85	15.25	975.95	4.70	25.50	991.37	1.71
5.25	805.91	30.82	15.50	976.72	4.55	25.75	991.53	1.68
5.50	822.35	28.89	15.75	977.45	4.41	26.00	991.70	1.65
5.75	836.81	27.08	16.00	978.14	4.28	26.25	991.85	1.62
6.00	849.61	25.39	16.25	978.81	4.15	26.50	992.01	1.59
6.25	860.98	23.82	16.50	979.44	4.03	26.75	992.15	1.56
6.50	871.12	22.37	16.75	980.05	3.91	27.00	992.30	1.53
6.75	880.20	21.03	17.00	980.63	3.80	27.25	992.44	1.50
7.00	888.37	19.80	17.25	981.18	3.69	27.50	992.58	1.47
7.25	895.73	18.65	17.50	981.71	3.59	27.75	992.71	1.45
7.50	902.40	17.60	17.75	982.22	3.49	28.00	992.84	1.42
7.75	908.45	16.63	18.00	982.71	3.40	28.25	992.96	1.40
8.00	913.96	15.72	18.25	983.18	3.31	28.50	993.09	1.37
8.25	918.99	14.89	18.50	983.63	3.22	28.75	993.21	1.35
8.50	923.60	14.12	18.75	984.06	3.14	29.00	993.32	1.33
8.75	927.83	13.40	19.00	984.48	3.06	29.25	993.44	1.30
9.00	931.71	12.73	19.25	984.88	2.98	29.50	993.55	1.28
9.25	935.30	12.11	19.50	985.26	2.91	29.75	993.65	1.26
9.50	938.61	11.53	19.75	985.63	2.83	30.00	993.76	1.24
9.75	941.67	10.99	20.00	985.98	2.77	30.25	993.86	1.22
10.00	944.51	10.49	20.25	986.33	2.70	30.50	993.96	1.20
10.25	947.15	10.02	20.50	986.66	2.63	30.75	994.06	1.18
10.50	949.60	9.58	20.75	986.98	2.57	31.00	994.15	1.16
10.75	951.89	9.17	21.00	987.28	2.51	31.25	994.25	1.14
11.00	954.03	8.78	21.25	987.58	2.45	31.50	994.34	1.13
11.25	956.03	8.41	21.50	987.87	2.40			
11.50	957.90	8.07	21.75	988.14	2.34			

**K=1**

$\theta$	0		$\theta$	0		$\theta$	0	
r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$
1.50	0.00	2000.00	11.75	983.70	1016.30	22.00	995.35	1004.65
1.75	265.31	1734.69	12.00	984.38	1015.63	22.25	995.46	1004.54
2.00	437.50	1562.50	12.25	985.01	1014.99	22.50	995.56	1004.44
2.25	555.56	1444.44	12.50	985.60	1014.40	22.75	995.65	1004.35
2.50	640.00	1360.00	12.75	986.16	1013.84	23.00	995.75	1004.25
2.75	702.48	1297.52	13.00	986.69	1013.31	23.25	995.84	1004.16
3.00	750.00	1250.00	13.25	987.18	1012.82	23.50	995.93	1004.07
3.25	786.98	1213.02	13.50	987.65	1012.35	23.75	996.01	1003.99
3.50	816.33	1183.67	13.75	988.10	1011.90	24.00	996.09	1003.91
3.75	840.00	1160.00	14.00	988.52	1011.48	24.25	996.17	1003.83
4.00	859.38	1140.63	14.25	988.92	1011.08	24.50	996.25	1003.75
4.25	875.43	1124.57	14.50	989.30	1010.70	24.75	996.33	1003.67
4.50	888.89	1111.11	14.75	989.66	1010.34	25.00	996.40	1003.60
4.75	900.28	1099.72	15.00	990.00	1010.00	25.25	996.47	1003.53
5.00	910.00	1090.00	15.25	990.33	1009.67	25.50	996.54	1003.46
5.25	918.37	1081.63	15.50	990.63	1009.37	25.75	996.61	1003.39
5.50	925.62	1074.38	15.75	990.93	1009.07	26.00	996.67	1003.33
5.75	931.95	1068.05	16.00	991.21	1008.79	26.25	996.73	1003.27
6.00	937.50	1062.50	16.25	991.48	1008.52	26.50	996.80	1003.20
6.25	942.40	1057.60	16.50	991.74	1008.26	26.75	996.86	1003.14
6.50	946.75	1053.25	16.75	991.98	1008.02	27.00	996.91	1003.09
6.75	950.62	1049.38	17.00	992.21	1007.79	27.25	996.97	1003.03
7.00	954.08	1045.92	17.25	992.44	1007.56	27.50	997.02	1002.98
7.25	957.19	1042.81	17.50	992.65	1007.35	27.75	997.08	1002.92
7.50	960.00	1040.00	17.75	992.86	1007.14	28.00	997.13	1002.87
7.75	962.54	1037.46	18.00	993.06	1006.94	28.25	997.18	1002.82
8.00	964.84	1035.16	18.25	993.24	1006.76	28.50	997.23	1002.77
8.25	966.94	1033.06	18.50	993.43	1006.57	28.75	997.28	1002.72
8.50	968.86	1031.14	18.75	993.60	1006.40	29.00	997.32	1002.68
8.75	970.61	1029.39	19.00	993.77	1006.23	29.25	997.37	1002.63
9.00	972.22	1027.78	19.25	993.93	1006.07	29.50	997.41	1002.59
9.25	973.70	1026.30	19.50	994.08	1005.92	29.75	997.46	1002.54
9.50	975.07	1024.93	19.75	994.23	1005.77	30.00	997.50	1002.50
9.75	976.33	1023.67	20.00	994.38	1005.63	30.25	997.54	1002.46
10.00	977.50	1022.50	20.25	994.51	1005.49	30.50	997.58	1002.42
10.25	978.58	1021.42	20.50	994.65	1005.35	30.75	997.62	1002.38
10.50	979.59	1020.41	20.75	994.77	1005.23	31.00	997.66	1002.34
10.75	980.53	1019.47	21.00	994.90	1005.10	31.25	997.70	1002.30
11.00	981.40	1018.60	21.25	995.02	1004.98	31.50	997.73	1002.27
11.25	982.22	1017.78	21.50	995.13	1004.87	22.00	995.35	1004.65
11.50	982.99	1017.01	21.75	995.24	1004.76	22.25	995.46	1004.54

$\theta$	90		$\theta$	90		$\theta$	90	
	$r$	$\sigma r$		$\sigma \theta$	$r$		$\sigma r$	$\sigma \theta$
1.50	0.00	2000.00	11.75	983.70	1016.30	22.00	995.35	1004.65
1.75	265.31	1734.69	12.00	984.38	1015.63	22.25	995.46	1004.54
2.00	437.50	1562.50	12.25	985.01	1014.99	22.50	995.56	1004.44
2.25	555.56	1444.44	12.50	985.60	1014.40	22.75	995.65	1004.35
2.50	640.00	1360.00	12.75	986.16	1013.84	23.00	995.75	1004.25
2.75	702.48	1297.52	13.00	986.69	1013.31	23.25	995.84	1004.16
3.00	750.00	1250.00	13.25	987.18	1012.82	23.50	995.93	1004.07
3.25	786.98	1213.02	13.50	987.65	1012.35	23.75	996.01	1003.99
3.50	816.33	1183.67	13.75	988.10	1011.90	24.00	996.09	1003.91
3.75	840.00	1160.00	14.00	988.52	1011.48	24.25	996.17	1003.83
4.00	859.38	1140.63	14.25	988.92	1011.08	24.50	996.25	1003.75
4.25	875.43	1124.57	14.50	989.30	1010.70	24.75	996.33	1003.67
4.50	888.89	1111.11	14.75	989.66	1010.34	25.00	996.40	1003.60
4.75	900.28	1099.72	15.00	990.00	1010.00	25.25	996.47	1003.53
5.00	910.00	1090.00	15.25	990.33	1009.67	25.50	996.54	1003.46
5.25	918.37	1081.63	15.50	990.63	1009.37	25.75	996.61	1003.39
5.50	925.62	1074.38	15.75	990.93	1009.07	26.00	996.67	1003.33
5.75	931.95	1068.05	16.00	991.21	1008.79	26.25	996.73	1003.27
6.00	937.50	1062.50	16.25	991.48	1008.52	26.50	996.80	1003.20
6.25	942.40	1057.60	16.50	991.74	1008.26	26.75	996.86	1003.14
6.50	946.75	1053.25	16.75	991.98	1008.02	27.00	996.91	1003.09
6.75	950.62	1049.38	17.00	992.21	1007.79	27.25	996.97	1003.03
7.00	954.08	1045.92	17.25	992.44	1007.56	27.50	997.02	1002.98
7.25	957.19	1042.81	17.50	992.65	1007.35	27.75	997.08	1002.92
7.50	960.00	1040.00	17.75	992.86	1007.14	28.00	997.13	1002.87
7.75	962.54	1037.46	18.00	993.06	1006.94	28.25	997.18	1002.82
8.00	964.84	1035.16	18.25	993.24	1006.76	28.50	997.23	1002.77
8.25	966.94	1033.06	18.50	993.43	1006.57	28.75	997.28	1002.72
8.50	968.86	1031.14	18.75	993.60	1006.40	29.00	997.32	1002.68
8.75	970.61	1029.39	19.00	993.77	1006.23	29.25	997.37	1002.63
9.00	972.22	1027.78	19.25	993.93	1006.07	29.50	997.41	1002.59
9.25	973.70	1026.30	19.50	994.08	1005.92	29.75	997.46	1002.54
9.50	975.07	1024.93	19.75	994.23	1005.77	30.00	997.50	1002.50
9.75	976.33	1023.67	20.00	994.38	1005.63	30.25	997.54	1002.46
10.00	977.50	1022.50	20.25	994.51	1005.49	30.50	997.58	1002.42
10.25	978.58	1021.42	20.50	994.65	1005.35	30.75	997.62	1002.38
10.50	979.59	1020.41	20.75	994.77	1005.23	31.00	997.66	1002.34
10.75	980.53	1019.47	21.00	994.90	1005.10	31.25	997.70	1002.30
11.00	981.40	1018.60	21.25	995.02	1004.98	31.50	997.73	1002.27
11.25	982.22	1017.78	21.50	995.13	1004.87			
11.50	982.99	1017.01	21.75	995.24	1004.76			

**K=2**

$\theta$	0		$\theta$	0		$\theta$	0	
r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$
1.50	0.00	1000.00	11.75	1943.36	1024.05	22.00	1983.76	1006.94
1.75	238.23	1292.38	12.00	1945.68	1023.07	22.25	1984.12	1006.79
2.00	505.86	1369.14	12.25	1947.86	1022.15	22.50	1984.47	1006.64
2.25	740.74	1370.37	12.50	1949.91	1021.29	22.75	1984.81	1006.49
2.50	934.40	1345.60	12.75	1951.84	1020.47	23.00	1985.14	1006.35
2.75	1091.46	1313.50	13.00	1953.67	1019.70	23.25	1985.46	1006.22
3.00	1218.75	1281.25	13.25	1955.39	1018.98	23.50	1985.77	1006.09
3.25	1322.50	1251.46	13.50	1957.02	1018.29	23.75	1986.06	1005.96
3.50	1407.75	1224.91	13.75	1958.56	1017.64	24.00	1986.35	1005.84
3.75	1478.40	1201.60	14.00	1960.02	1017.02	24.25	1986.63	1005.72
4.00	1537.48	1181.27	14.25	1961.40	1016.44	24.50	1986.90	1005.60
4.25	1587.29	1163.58	14.50	1962.72	1015.88	24.75	1987.16	1005.49
4.50	1629.63	1148.15	14.75	1963.96	1015.35	25.00	1987.42	1005.38
4.75	1665.89	1134.67	15.00	1965.15	1014.85	25.25	1987.67	1005.27
5.00	1697.15	1122.85	15.25	1966.28	1014.37	25.50	1987.91	1005.17
5.25	1724.28	1112.45	15.50	1967.35	1013.92	25.75	1988.14	1005.07
5.50	1747.97	1103.27	15.75	1968.38	1013.48	26.00	1988.37	1004.98
5.75	1768.76	1095.13	16.00	1969.35	1013.07	26.25	1988.59	1004.88
6.00	1787.11	1087.89	16.25	1970.29	1012.67	26.50	1988.80	1004.79
6.25	1803.38	1081.42	16.50	1971.18	1012.29	26.75	1989.01	1004.70
6.50	1817.86	1075.63	16.75	1972.03	1011.93	27.00	1989.21	1004.62
6.75	1830.82	1070.42	17.00	1972.84	1011.59	27.25	1989.41	1004.53
7.00	1842.45	1065.71	17.25	1973.62	1011.26	27.50	1989.60	1004.45
7.25	1852.93	1061.46	17.50	1974.37	1010.94	27.75	1989.79	1004.37
7.50	1862.40	1057.60	17.75	1975.08	1010.64	28.00	1989.97	1004.29
7.75	1870.99	1054.09	18.00	1975.77	1010.34	28.25	1990.14	1004.22
8.00	1878.81	1050.88	18.25	1976.42	1010.06	28.50	1990.32	1004.14
8.25	1885.94	1047.95	18.50	1977.06	1009.80	28.75	1990.48	1004.07
8.50	1892.46	1045.26	18.75	1977.66	1009.54	29.00	1990.65	1004.00
8.75	1898.44	1042.79	19.00	1978.24	1009.29	29.25	1990.81	1003.93
9.00	1903.94	1040.51	19.25	1978.80	1009.05	29.50	1990.96	1003.87
9.25	1909.00	1038.41	19.50	1979.34	1008.82	29.75	1991.11	1003.80
9.50	1913.67	1036.46	19.75	1979.86	1008.60	30.00	1991.26	1003.74
9.75	1918.00	1034.66	20.00	1980.36	1008.39	30.25	1991.40	1003.68
10.00	1922.01	1032.99	20.25	1980.84	1008.19	30.50	1991.54	1003.62
10.25	1925.73	1031.44	20.50	1981.30	1007.99	30.75	1991.68	1003.56
10.50	1929.20	1029.99	20.75	1981.75	1007.80	31.00	1991.81	1003.50
10.75	1932.42	1028.64	21.00	1982.18	1007.61	31.25	1991.94	1003.45
11.00	1935.44	1027.37	21.25	1982.60	1007.44	31.50	1992.07	1003.39
11.25	1938.25	1026.19	21.50	1983.00	1007.27			
11.50	1940.89	1025.09	21.75	1983.39	1007.10			

$\theta$	90		$\theta$	90		$\theta$	90	
	$r$	$\sigma r$		$\sigma \theta$	$r$		$\sigma r$	$\sigma \theta$
1.5	0	5000	11.75	1007.75	2024.84	22.00	1002.29	2007.01
1.75	557.68	3911.70	12.00	1007.45	2023.80	22.25	1002.24	2006.85
2.00	806.64	3318.36	12.25	1007.16	2022.83	22.50	1002.19	2006.70
2.25	925.93	2962.96	12.50	1006.89	2021.91	22.75	1002.15	2006.55
2.50	985.60	2734.40	12.75	1006.63	2021.05	23.00	1002.10	2006.41
2.75	1015.98	2579.06	13.00	1006.39	2020.24	23.25	1002.06	2006.27
3.00	1031.25	2468.75	13.25	1006.16	2019.47	23.50	1002.01	2006.14
3.25	1038.44	2387.59	13.50	1005.94	2018.75	23.75	1001.97	2006.01
3.50	1041.23	2326.11	13.75	1005.74	2018.06	24.00	1001.93	2005.88
3.75	1041.60	2278.40	14.00	1005.54	2017.42	24.25	1001.89	2005.76
4.00	1040.65	2240.60	14.25	1005.36	2016.80	24.50	1001.85	2005.64
4.25	1039.01	2210.13	14.50	1005.18	2016.22	24.75	1001.82	2005.53
4.50	1037.04	2185.19	14.75	1005.01	2015.67	25.00	1001.78	2005.42
4.75	1034.94	2164.50	15.00	1004.85	2015.15	25.25	1001.75	2005.31
5.00	1032.85	2147.15	15.25	1004.70	2014.65	25.50	1001.71	2005.21
5.25	1030.82	2132.44	15.50	1004.55	2014.18	25.75	1001.68	2005.11
5.50	1028.89	2119.87	15.75	1004.41	2013.73	26.00	1001.65	2005.01
5.75	1027.08	2109.03	16.00	1004.28	2013.30	26.25	1001.62	2004.91
6.00	1025.39	2099.61	16.25	1004.15	2012.89	26.50	1001.59	2004.82
6.25	1023.82	2091.38	16.50	1004.03	2012.50	26.75	1001.56	2004.73
6.50	1022.37	2084.14	16.75	1003.91	2012.13	27.00	1001.53	2004.64
6.75	1021.03	2077.73	17.00	1003.80	2011.77	27.25	1001.50	2004.56
7.00	1019.80	2072.04	17.25	1003.69	2011.43	27.50	1001.47	2004.48
7.25	1018.65	2066.96	17.50	1003.59	2011.10	27.75	1001.45	2004.40
7.50	1017.60	2062.40	17.75	1003.49	2010.79	28.00	1001.42	2004.32
7.75	1016.63	2058.30	18.00	1003.40	2010.49	28.25	1001.40	2004.24
8.00	1015.72	2054.59	18.25	1003.31	2010.20	28.50	1001.37	2004.17
8.25	1014.89	2051.23	18.50	1003.22	2009.93	28.75	1001.35	2004.09
8.50	1014.12	2048.17	18.75	1003.14	2009.66	29.00	1001.33	2004.02
8.75	1013.40	2045.38	19.00	1003.06	2009.41	29.25	1001.30	2003.96
9.00	1012.73	2042.82	19.25	1002.98	2009.16	29.50	1001.28	2003.89
9.25	1012.11	2040.48	19.50	1002.91	2008.93	29.75	1001.26	2003.82
9.50	1011.53	2038.33	19.75	1002.83	2008.70	30.00	1001.24	2003.76
9.75	1010.99	2036.34	20.00	1002.77	2008.48	30.25	1001.22	2003.70
10.00	1010.49	2034.51	20.25	1002.70	2008.28	30.50	1001.20	2003.64
10.25	1010.02	2032.81	20.50	1002.63	2008.07	30.75	1001.18	2003.58
10.50	1009.58	2031.24	20.75	1002.57	2007.88	31.00	1001.16	2003.52
10.75	1009.17	2029.77	21.00	1002.51	2007.69	31.25	1001.14	2003.46
11.00	1008.78	2028.41	21.25	1002.45	2007.51	31.50	1001.13	2003.41
11.25	1008.41	2027.14	21.50	1002.40	2007.34			
11.50	1008.07	2025.95	21.75	1002.34	2007.17			



**K=3**

$\theta$	0		$\theta$	0		$\theta$	0	
r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$
1.50	0.00	0.00	11.75	2903.01	1031.80	22.00	2972.17	1009.23
1.75	211.16	850.06	12.00	2906.98	1030.52	22.25	2972.79	1009.03
2.00	574.22	1175.78	12.25	2910.71	1029.31	22.50	2973.39	1008.83
2.25	925.93	1296.30	12.50	2914.22	1028.18	22.75	2973.97	1008.64
2.50	1228.80	1331.20	12.75	2917.53	1027.11	23.00	2974.53	1008.45
2.75	1480.43	1329.49	13.00	2920.65	1026.10	23.25	2975.08	1008.27
3.00	1687.50	1312.50	13.25	2923.60	1025.14	23.50	2975.60	1008.10
3.25	1858.02	1289.91	13.50	2926.38	1024.23	23.75	2976.11	1007.93
3.50	1999.17	1266.14	13.75	2929.02	1023.38	24.00	2976.61	1007.77
3.75	2116.80	1243.20	14.00	2931.52	1022.56	24.25	2977.09	1007.61
4.00	2215.58	1221.92	14.25	2933.89	1021.79	24.50	2977.55	1007.45
4.25	2299.15	1202.58	14.50	2936.13	1021.06	24.75	2978.00	1007.31
4.50	2370.37	1185.19	14.75	2938.27	1020.36	25.00	2978.44	1007.16
4.75	2431.50	1169.61	15.00	2940.30	1019.70	25.25	2978.86	1007.02
5.00	2484.30	1155.70	15.25	2942.23	1019.07	25.50	2979.27	1006.88
5.25	2530.20	1143.27	15.50	2944.07	1018.47	25.75	2979.67	1006.75
5.50	2570.32	1132.16	15.75	2945.83	1017.89	26.00	2980.06	1006.62
5.75	2605.58	1122.21	16.00	2947.50	1017.35	26.25	2980.44	1006.50
6.00	2636.72	1113.28	16.25	2949.09	1016.82	26.50	2980.81	1006.38
6.25	2664.35	1105.25	16.50	2950.62	1016.32	26.75	2981.16	1006.26
6.50	2688.98	1098.00	16.75	2952.08	1015.85	27.00	2981.51	1006.14
6.75	2711.02	1091.45	17.00	2953.47	1015.39	27.25	2981.85	1006.03
7.00	2730.82	1085.51	17.25	2954.80	1014.95	27.50	2982.18	1005.92
7.25	2748.66	1080.12	17.50	2956.08	1014.53	27.75	2982.49	1005.82
7.50	2764.80	1075.20	17.75	2957.30	1014.13	28.00	2982.81	1005.72
7.75	2779.44	1070.71	18.00	2958.48	1013.74	28.25	2983.11	1005.61
8.00	2792.77	1066.60	18.25	2959.60	1013.37	28.50	2983.40	1005.52
8.25	2804.93	1062.84	18.50	2960.68	1013.02	28.75	2983.69	1005.42
8.50	2816.06	1059.37	18.75	2961.72	1012.68	29.00	2983.97	1005.33
8.75	2826.26	1056.18	19.00	2962.72	1012.35	29.25	2984.24	1005.24
9.00	2835.65	1053.24	19.25	2963.68	1012.03	29.50	2984.51	1005.15
9.25	2844.30	1050.52	19.50	2964.60	1011.73	29.75	2984.77	1005.06
9.50	2852.28	1048.00	19.75	2965.49	1011.44	30.00	2985.02	1004.98
9.75	2859.67	1045.66	20.00	2966.34	1011.16	30.25	2985.27	1004.90
10.00	2866.52	1043.48	20.25	2967.17	1010.88	30.50	2985.51	1004.82
10.25	2872.88	1041.46	20.50	2967.96	1010.62	30.75	2985.74	1004.74
10.50	2878.80	1039.57	20.75	2968.73	1010.37	31.00	2985.97	1004.67
10.75	2884.32	1037.80	21.00	2969.47	1010.13	31.25	2986.19	1004.59
11.00	2889.47	1036.15	21.25	2970.18	1009.89	31.50	2986.41	1004.52
11.25	2894.28	1034.61	21.50	2970.87	1009.66			
11.50	2898.79	1033.16	21.75	2971.53	1009.44			

$\theta$	90		$\theta$	90		$\theta$	90	
	$r$	$\sigma r$		$\sigma \theta$	$r$		$\sigma r$	$\sigma \theta$
1.50	0.00	8000.00	11.75	1031.80	3033.39	22.00	1009.23	3009.36
1.75	850.06	6088.71	12.00	1030.52	3031.98	22.25	1009.03	3009.15
2.00	1175.78	5074.22	12.25	1029.31	3030.66	22.50	1008.83	3008.95
2.25	1296.30	4481.48	12.50	1028.18	3029.42	22.75	1008.64	3008.75
2.50	1331.20	4108.80	12.75	1027.11	3028.26	23.00	1008.45	3008.56
2.75	1329.49	3860.60	13.00	1026.10	3027.16	23.25	1008.27	3008.38
3.00	1312.50	3687.50	13.25	1025.14	3026.12	23.50	1008.10	3008.20
3.25	1289.91	3562.17	13.50	1024.23	3025.15	23.75	1007.93	3008.03
3.50	1266.14	3468.55	13.75	1023.38	3024.23	24.00	1007.77	3007.86
3.75	1243.20	3396.80	14.00	1022.56	3023.35	24.25	1007.61	3007.70
4.00	1221.92	3340.58	14.25	1021.79	3022.53	24.50	1007.45	3007.54
4.25	1202.58	3295.69	14.50	1021.06	3021.75	24.75	1007.31	3007.39
4.50	1185.19	3259.26	14.75	1020.36	3021.00	25.00	1007.16	3007.24
4.75	1169.61	3229.28	15.00	1019.70	3020.30	25.25	1007.02	3007.10
5.00	1155.70	3204.30	15.25	1019.07	3019.63	25.50	1006.88	3006.96
5.25	1143.27	3183.26	15.50	1018.47	3018.99	25.75	1006.75	3006.82
5.50	1132.16	3165.36	15.75	1017.89	3018.39	26.00	1006.62	3006.69
5.75	1122.21	3150.00	16.00	1017.35	3017.81	26.25	1006.50	3006.56
6.00	1113.28	3136.72	16.25	1016.82	3017.26	26.50	1006.38	3006.44
6.25	1105.25	3125.15	16.50	1016.32	3016.73	26.75	1006.26	3006.32
6.50	1098.00	3115.02	16.75	1015.85	3016.23	27.00	1006.14	3006.20
6.75	1091.45	3106.08	17.00	1015.39	3015.75	27.25	1006.03	3006.09
7.00	1085.51	3098.16	17.25	1014.95	3015.29	27.50	1005.92	3005.98
7.25	1080.12	3091.11	17.50	1014.53	3014.86	27.75	1005.82	3005.87
7.50	1075.20	3084.80	17.75	1014.13	3014.44	28.00	1005.72	3005.76
7.75	1070.71	3079.13	18.00	1013.74	3014.03	28.25	1005.61	3005.66
8.00	1066.60	3074.02	18.25	1013.37	3013.65	28.50	1005.52	3005.56
8.25	1062.84	3069.39	18.50	1013.02	3013.28	28.75	1005.42	3005.47
8.50	1059.37	3065.19	18.75	1012.68	3012.92	29.00	1005.33	3005.37
8.75	1056.18	3061.37	19.00	1012.35	3012.58	29.25	1005.24	3005.28
9.00	1053.24	3057.87	19.25	1012.03	3012.25	29.50	1005.15	3005.19
9.25	1050.52	3054.67	19.50	1011.73	3011.94	29.75	1005.06	3005.10
9.50	1048.00	3051.73	19.75	1011.44	3011.64	30.00	1004.98	3005.02
9.75	1045.66	3049.02	20.00	1011.16	3011.34	30.25	1004.90	3004.94
10.00	1043.48	3046.52	20.25	1010.88	3011.06	30.50	1004.82	3004.85
10.25	1041.46	3044.21	20.50	1010.62	3010.79	30.75	1004.74	3004.78
10.50	1039.57	3042.07	20.75	1010.37	3010.53	31.00	1004.67	3004.70
10.75	1037.80	3040.08	21.00	1010.13	3010.28	31.25	1004.59	3004.62
11.00	1036.15	3038.23	21.25	1009.89	3010.04	31.50	1004.52	3004.55
11.25	1034.61	3036.50	21.50	1009.66	3009.81			
11.50	1033.16	3034.89	21.75	1009.44	3009.58			

**K=4**

$\theta$	0		$\theta$	0		$\theta$	0	
r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	r	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$
1.50	0.00	-1000.00	11.75	3862.67	1039.55	22.00	3960.58	1011.52
1.75	184.09	407.75	12.00	3868.29	1037.96	22.25	3961.46	1011.27
2.00	642.58	982.42	12.25	3873.56	1036.47	22.50	3962.31	1011.02
2.25	1111.11	1222.22	12.50	3878.53	1035.07	22.75	3963.13	1010.78
2.50	1523.20	1316.80	12.75	3883.21	1033.74	23.00	3963.93	1010.55
2.75	1869.41	1345.47	13.00	3887.63	1032.49	23.25	3964.70	1010.33
3.00	2156.25	1343.75	13.25	3891.80	1031.30	23.50	3965.44	1010.11
3.25	2393.54	1328.35	13.50	3895.75	1030.18	23.75	3966.17	1009.90
3.50	2590.59	1307.37	13.75	3899.48	1029.11	24.00	3966.87	1009.70
3.75	2755.20	1284.80	14.00	3903.02	1028.11	24.25	3967.54	1009.50
4.00	2893.68	1262.57	14.25	3906.37	1027.15	24.50	3968.20	1009.31
4.25	3011.00	1241.59	14.50	3909.55	1026.24	24.75	3968.84	1009.12
4.50	3111.11	1222.22	14.75	3912.58	1025.37	25.00	3969.46	1008.94
4.75	3197.11	1204.56	15.00	3915.45	1024.55	25.25	3970.06	1008.77
5.00	3271.45	1188.55	15.25	3918.19	1023.77	25.50	3970.64	1008.60
5.25	3336.11	1174.09	15.50	3920.79	1023.02	25.75	3971.21	1008.43
5.50	3392.66	1161.05	15.75	3923.27	1022.31	26.00	3971.76	1008.27
5.75	3442.39	1149.29	16.00	3925.64	1021.63	26.25	3972.29	1008.12
6.00	3486.33	1138.67	16.25	3927.90	1020.98	26.50	3972.81	1007.96
6.25	3525.33	1129.07	16.50	3930.06	1020.35	26.75	3973.32	1007.82
6.50	3560.10	1120.37	16.75	3932.12	1019.76	27.00	3973.81	1007.67
6.75	3591.22	1112.48	17.00	3934.10	1019.19	27.25	3974.29	1007.53
7.00	3619.18	1105.31	17.25	3935.99	1018.65	27.50	3974.75	1007.40
7.25	3644.39	1098.77	17.50	3937.79	1018.12	27.75	3975.20	1007.27
7.50	3667.20	1092.80	17.75	3939.53	1017.62	28.00	3975.64	1007.14
7.75	3687.90	1087.34	18.00	3941.19	1017.14	28.25	3976.07	1007.01
8.00	3706.73	1082.33	18.25	3942.78	1016.68	28.50	3976.49	1006.89
8.25	3723.93	1077.73	18.50	3944.31	1016.24	28.75	3976.90	1006.77
8.50	3739.66	1073.49	18.75	3945.78	1015.82	29.00	3977.29	1006.66
8.75	3754.09	1069.58	19.00	3947.20	1015.41	29.25	3977.68	1006.54
9.00	3767.36	1065.97	19.25	3948.56	1015.01	29.50	3978.05	1006.43
9.25	3779.59	1062.63	19.50	3949.86	1014.64	29.75	3978.42	1006.33
9.50	3790.89	1059.53	19.75	3951.12	1014.27	30.00	3978.78	1006.22
9.75	3801.34	1056.65	20.00	3952.33	1013.92	30.25	3979.13	1006.12
10.00	3811.03	1053.97	20.25	3953.50	1013.58	30.50	3979.47	1006.02
10.25	3820.03	1051.48	20.50	3954.62	1013.26	30.75	3979.80	1005.92
10.50	3828.40	1049.15	20.75	3955.70	1012.94	31.00	3980.12	1005.83
10.75	3836.21	1046.97	21.00	3956.75	1012.64	31.25	3980.44	1005.74
11.00	3843.50	1044.93	21.25	3957.76	1012.35	31.50	3980.75	1005.65
11.25	3850.31	1043.02	21.50	3958.73	1012.06			
11.50	3856.69	1041.23	21.75	3959.67	1011.79			

$\theta$	90		$\theta$	90		$\theta$	90	
	$r$	$\sigma_r$		$\sigma_\theta$	$r$		$\sigma_r$	$\sigma_\theta$
1.50	0.00	11000.00	11.75	1055.84	4041.94	22.00	1016.17	4011.72
1.75	1142.44	8265.72	12.00	1053.59	4040.16	22.25	1015.81	4011.46
2.00	1544.92	6830.08	12.25	1051.47	4038.50	22.50	1015.47	4011.20
2.25	1666.67	6000.00	12.50	1049.47	4036.93	22.75	1015.13	4010.95
2.50	1676.80	5483.20	12.75	1047.58	4035.46	23.00	1014.81	4010.71
2.75	1642.99	5142.14	13.00	1045.80	4034.08	23.25	1014.49	4010.48
3.00	1593.75	4906.25	13.25	1044.12	4032.78	23.50	1014.19	4010.26
3.25	1541.37	4736.74	13.50	1042.52	4031.55	23.75	1013.89	4010.04
3.50	1491.05	4611.00	13.75	1041.02	4030.39	24.00	1013.60	4009.83
3.75	1444.80	4515.20	14.00	1039.59	4029.29	24.25	1013.33	4009.63
4.00	1403.20	4440.55	14.25	1038.23	4028.25	24.50	1013.06	4009.43
4.25	1366.16	4381.25	14.50	1036.94	4027.27	24.75	1012.80	4009.24
4.50	1333.33	4333.33	14.75	1035.72	4026.34	25.00	1012.54	4009.06
4.75	1304.28	4294.06	15.00	1034.55	4025.45	25.25	1012.30	4008.88
5.00	1278.55	4261.45	15.25	1033.44	4024.61	25.50	1012.06	4008.70
5.25	1255.73	4234.07	15.50	1032.38	4023.81	25.75	1011.82	4008.54
5.50	1235.43	4210.85	15.75	1031.38	4023.05	26.00	1011.60	4008.37
5.75	1217.34	4190.97	16.00	1030.41	4022.32	26.25	1011.38	4008.21
6.00	1201.17	4173.83	16.25	1029.50	4021.63	26.50	1011.17	4008.06
6.25	1186.67	4158.93	16.50	1028.62	4020.97	26.75	1010.96	4007.91
6.50	1173.63	4145.90	16.75	1027.78	4020.34	27.00	1010.76	4007.76
6.75	1161.87	4134.43	17.00	1026.98	4019.74	27.25	1010.56	4007.62
7.00	1151.23	4124.28	17.25	1026.21	4019.16	27.50	1010.37	4007.48
7.25	1141.58	4115.26	17.50	1025.47	4018.61	27.75	1010.19	4007.34
7.50	1132.80	4107.20	17.75	1024.77	4018.08	28.00	1010.01	4007.21
7.75	1124.80	4099.97	18.00	1024.09	4017.58	28.25	1009.83	4007.08
8.00	1117.49	4093.45	18.25	1023.44	4017.09	28.50	1009.66	4006.96
8.25	1110.78	4087.56	18.50	1022.82	4016.63	28.75	1009.49	4006.84
8.50	1104.63	4082.22	18.75	1022.22	4016.18	29.00	1009.33	4006.72
8.75	1098.97	4077.36	19.00	1021.64	4015.76	29.25	1009.17	4006.61
9.00	1093.75	4072.92	19.25	1021.09	4015.35	29.50	1009.02	4006.49
9.25	1088.93	4068.85	19.50	1020.55	4014.95	29.75	1008.87	4006.38
9.50	1084.46	4065.12	19.75	1020.04	4014.57	30.00	1008.72	4006.28
9.75	1080.32	4061.69	20.00	1019.55	4014.20	30.25	1008.58	4006.17
10.00	1076.47	4058.53	20.25	1019.07	4013.85	30.50	1008.44	4006.07
10.25	1072.89	4055.60	20.50	1018.61	4013.51	30.75	1008.30	4005.97
10.50	1069.55	4052.89	20.75	1018.17	4013.19	31.00	1008.17	4005.88
10.75	1066.44	4050.38	21.00	1017.74	4012.87	31.25	1008.04	4005.78
11.00	1063.53	4048.04	21.25	1017.33	4012.57	31.50	1007.91	4005.69
11.25	1060.80	4045.87	21.50	1016.93	4012.28			
11.50	1058.24	4043.84	21.75	1016.55	4011.99			

**Tensões normalizadas para todos os valores de k**

$\theta$	0					$\theta$	0				
	k=0	k=1	k=2	k=3	K=4		k=0	k=1	k=2	k=3	K=4
r/a	$\sigma_{\theta}/p_2$	$\sigma_{\theta}/p_2$	$\sigma_{\theta}/p_2$	$\sigma_{\theta}/p_2$	$\sigma_{\theta}/p_2$	r/a	$\sigma_{\theta}/p_2$	$\sigma_{\theta}/p_2$	$\sigma_{\theta}/p_2$	$\sigma_{\theta}/p_2$	$\sigma_{\theta}/p_2$
1.00	3.000	2.000	1.000	0.000	-1.000	11.17	1.004	1.008	1.012	1.016	1.020
1.17	2.177	1.735	1.292	0.850	0.408	11.33	1.004	1.008	1.012	1.015	1.019
1.33	1.756	1.563	1.369	1.176	0.982	11.50	1.004	1.008	1.011	1.015	1.019
1.50	1.519	1.444	1.370	1.296	1.222	11.67	1.004	1.007	1.011	1.015	1.018
1.67	1.374	1.360	1.346	1.331	1.317	11.83	1.004	1.007	1.011	1.014	1.018
1.83	1.282	1.298	1.314	1.329	1.345	12.00	1.004	1.007	1.010	1.014	1.017
2.00	1.219	1.250	1.281	1.313	1.344	12.17	1.003	1.007	1.010	1.013	1.017
2.17	1.175	1.213	1.251	1.290	1.328	12.33	1.003	1.007	1.010	1.013	1.016
2.33	1.142	1.184	1.225	1.266	1.307	12.50	1.003	1.006	1.010	1.013	1.016
2.50	1.118	1.160	1.202	1.243	1.285	12.67	1.003	1.006	1.009	1.012	1.015
2.67	1.100	1.141	1.181	1.222	1.263	12.83	1.003	1.006	1.009	1.012	1.015
2.83	1.086	1.125	1.164	1.203	1.242	13.00	1.003	1.006	1.009	1.012	1.015
3.00	1.074	1.111	1.148	1.185	1.222	13.17	1.003	1.006	1.009	1.011	1.014
3.17	1.065	1.100	1.135	1.170	1.205	13.33	1.003	1.006	1.008	1.011	1.014
3.33	1.057	1.090	1.123	1.156	1.189	13.50	1.003	1.005	1.008	1.011	1.014
3.50	1.051	1.082	1.112	1.143	1.174	13.67	1.003	1.005	1.008	1.011	1.013
3.67	1.045	1.074	1.103	1.132	1.161	13.83	1.003	1.005	1.008	1.010	1.013
3.83	1.041	1.068	1.095	1.122	1.149	14.00	1.003	1.005	1.008	1.010	1.013
4.00	1.037	1.063	1.088	1.113	1.139	14.17	1.003	1.005	1.007	1.010	1.012
4.17	1.034	1.058	1.081	1.105	1.129	14.33	1.002	1.005	1.007	1.010	1.012
4.33	1.031	1.053	1.076	1.098	1.120	14.50	1.002	1.005	1.007	1.009	1.012
4.50	1.028	1.049	1.070	1.091	1.112	14.67	1.002	1.005	1.007	1.009	1.012
4.67	1.026	1.046	1.066	1.086	1.105	14.83	1.002	1.005	1.007	1.009	1.011
4.83	1.024	1.043	1.061	1.080	1.099	15.00	1.002	1.004	1.007	1.009	1.011
5.00	1.022	1.040	1.058	1.075	1.093	15.17	1.002	1.004	1.006	1.009	1.011
5.17	1.021	1.037	1.054	1.071	1.087	15.33	1.002	1.004	1.006	1.008	1.011
5.33	1.019	1.035	1.051	1.067	1.082	15.50	1.002	1.004	1.006	1.008	1.010
5.50	1.018	1.033	1.048	1.063	1.078	15.67	1.002	1.004	1.006	1.008	1.010
5.67	1.017	1.031	1.045	1.059	1.073	15.83	1.002	1.004	1.006	1.008	1.010
5.83	1.016	1.029	1.043	1.056	1.070	16.00	1.002	1.004	1.006	1.008	1.010
6.00	1.015	1.028	1.041	1.053	1.066	16.17	1.002	1.004	1.006	1.008	1.009
6.17	1.014	1.026	1.038	1.051	1.063	16.33	1.002	1.004	1.006	1.007	1.009
6.33	1.013	1.025	1.036	1.048	1.060	16.50	1.002	1.004	1.005	1.007	1.009
6.50	1.013	1.024	1.035	1.046	1.057	16.67	1.002	1.004	1.005	1.007	1.009
6.67	1.012	1.023	1.033	1.043	1.054	16.83	1.002	1.004	1.005	1.007	1.009
6.83	1.011	1.021	1.031	1.041	1.051	17.00	1.002	1.003	1.005	1.007	1.009
7.00	1.011	1.020	1.030	1.040	1.049	17.17	1.002	1.003	1.005	1.007	1.008
7.17	1.010	1.019	1.029	1.038	1.047	17.33	1.002	1.003	1.005	1.007	1.008
7.33	1.010	1.019	1.027	1.036	1.045	17.50	1.002	1.003	1.005	1.006	1.008
7.50	1.009	1.018	1.026	1.035	1.043	17.67	1.002	1.003	1.005	1.006	1.008
7.67	1.009	1.017	1.025	1.033	1.041	17.83	1.002	1.003	1.005	1.006	1.008
7.83	1.009	1.016	1.024	1.032	1.040	18.00	1.002	1.003	1.005	1.006	1.008
8.00	1.008	1.016	1.023	1.031	1.038	18.17	1.002	1.003	1.005	1.006	1.008
8.17	1.008	1.015	1.022	1.029	1.036	18.33	1.002	1.003	1.004	1.006	1.007
8.33	1.008	1.014	1.021	1.028	1.035	18.50	1.001	1.003	1.004	1.006	1.007
8.50	1.007	1.014	1.020	1.027	1.034	18.67	1.001	1.003	1.004	1.006	1.007
8.67	1.007	1.013	1.020	1.026	1.032	18.83	1.001	1.003	1.004	1.006	1.007
8.83	1.007	1.013	1.019	1.025	1.031	19.00	1.001	1.003	1.004	1.006	1.007
9.00	1.006	1.012	1.018	1.024	1.030	19.17	1.001	1.003	1.004	1.005	1.007
9.17	1.006	1.012	1.018	1.023	1.029	19.33	1.001	1.003	1.004	1.005	1.007

9.33	1.006	1.011	1.017	1.023	1.028	19.50	1.001	1.003	1.004	1.005	1.007
9.50	1.006	1.011	1.016	1.022	1.027	19.67	1.001	1.003	1.004	1.005	1.006
9.67	1.006	1.011	1.016	1.021	1.026	19.83	1.001	1.003	1.004	1.005	1.006
9.83	1.005	1.010	1.015	1.020	1.025	20.00	1.001	1.003	1.004	1.005	1.006
10.00	1.005	1.010	1.015	1.020	1.025	20.17	1.001	1.002	1.004	1.005	1.006
10.17	1.005	1.010	1.014	1.019	1.024	20.33	1.001	1.002	1.004	1.005	1.006
10.33	1.005	1.009	1.014	1.018	1.023	20.50	1.001	1.002	1.004	1.005	1.006
10.50	1.005	1.009	1.013	1.018	1.022	20.67	1.001	1.002	1.004	1.005	1.006
10.67	1.005	1.009	1.013	1.017	1.022	20.83	1.001	1.002	1.003	1.005	1.006
10.83	1.004	1.009	1.013	1.017	1.021	21.00	1.001	1.002	1.003	1.005	1.006
11.00	1.004	1.008	1.012	1.016	1.020						

θ	90					θ	90				
	k=0	k=1	k=2	k=3	K=4		k=0	k=1	k=2	k=3	K=4
r/a	σθ/p2	σθ/p2	σθ/p2	σθ/p2	σθ/p2	r/a	σθ/p2	σθ/p2	σθ/p2	σθ/p2	σθ/p2
1.00	-1.000	2.000	5.000	8.000	11.000	11.17	0.004	1.008	2.012	3.016	4.020
1.17	-0.442	1.735	3.912	6.089	8.266	11.33	0.004	1.008	2.012	3.016	4.020
1.33	-0.193	1.563	3.318	5.074	6.830	11.50	0.004	1.008	2.011	3.015	4.019
1.50	-0.074	1.444	2.963	4.481	6.000	11.67	0.004	1.007	2.011	3.015	4.019
1.67	-0.014	1.360	2.734	4.109	5.483	11.83	0.003	1.007	2.011	3.014	4.018
1.83	0.016	1.298	2.579	3.861	5.142	12.00	0.003	1.007	2.010	3.014	4.018
2.00	0.031	1.250	2.469	3.688	4.906	12.17	0.003	1.007	2.010	3.014	4.017
2.17	0.038	1.213	2.388	3.562	4.737	12.33	0.003	1.007	2.010	3.013	4.017
2.33	0.041	1.184	2.326	3.469	4.611	12.50	0.003	1.006	2.010	3.013	4.016
2.50	0.042	1.160	2.278	3.397	4.515	12.67	0.003	1.006	2.009	3.013	4.016
2.67	0.041	1.141	2.241	3.341	4.441	12.83	0.003	1.006	2.009	3.012	4.015
2.83	0.039	1.125	2.210	3.296	4.381	13.00	0.003	1.006	2.009	3.012	4.015
3.00	0.037	1.111	2.185	3.259	4.333	13.17	0.003	1.006	2.009	3.012	4.015
3.17	0.035	1.100	2.165	3.229	4.294	13.33	0.003	1.006	2.008	3.011	4.014
3.33	0.033	1.090	2.147	3.204	4.261	13.50	0.003	1.005	2.008	3.011	4.014
3.50	0.031	1.082	2.132	3.183	4.234	13.67	0.003	1.005	2.008	3.011	4.014
3.67	0.029	1.074	2.120	3.165	4.211	13.83	0.003	1.005	2.008	3.011	4.013
3.83	0.027	1.068	2.109	3.150	4.191	14.00	0.003	1.005	2.008	3.010	4.013
4.00	0.025	1.063	2.100	3.137	4.174	14.17	0.002	1.005	2.008	3.010	4.013
4.17	0.024	1.058	2.091	3.125	4.159	14.33	0.002	1.005	2.007	3.010	4.012
4.33	0.022	1.053	2.084	3.115	4.146	14.50	0.002	1.005	2.007	3.010	4.012
4.50	0.021	1.049	2.078	3.106	4.134	14.67	0.002	1.005	2.007	3.009	4.012
4.67	0.020	1.046	2.072	3.098	4.124	14.83	0.002	1.005	2.007	3.009	4.011
4.83	0.019	1.043	2.067	3.091	4.115	15.00	0.002	1.004	2.007	3.009	4.011
5.00	0.018	1.040	2.062	3.085	4.107	15.17	0.002	1.004	2.007	3.009	4.011
5.17	0.017	1.037	2.058	3.079	4.100	15.33	0.002	1.004	2.006	3.009	4.011
5.33	0.016	1.035	2.055	3.074	4.093	15.50	0.002	1.004	2.006	3.008	4.010
5.50	0.015	1.033	2.051	3.069	4.088	15.67	0.002	1.004	2.006	3.008	4.010
5.67	0.014	1.031	2.048	3.065	4.082	15.83	0.002	1.004	2.006	3.008	4.010
5.83	0.013	1.029	2.045	3.061	4.077	16.00	0.002	1.004	2.006	3.008	4.010
6.00	0.013	1.028	2.043	3.058	4.073	16.17	0.002	1.004	2.006	3.008	4.010
6.17	0.012	1.026	2.040	3.055	4.069	16.33	0.002	1.004	2.006	3.008	4.009
6.33	0.012	1.025	2.038	3.052	4.065	16.50	0.002	1.004	2.006	3.007	4.009
6.50	0.011	1.024	2.036	3.049	4.062	16.67	0.002	1.004	2.005	3.007	4.009
6.67	0.010	1.023	2.035	3.047	4.059	16.83	0.002	1.004	2.005	3.007	4.009
6.83	0.010	1.021	2.033	3.044	4.056	17.00	0.002	1.003	2.005	3.007	4.009
7.00	0.010	1.020	2.031	3.042	4.053	17.17	0.002	1.003	2.005	3.007	4.009
7.17	0.009	1.019	2.030	3.040	4.050	17.33	0.002	1.003	2.005	3.007	4.008
7.33	0.009	1.019	2.028	3.038	4.048	17.50	0.002	1.003	2.005	3.007	4.008



7.50	0.008	1.018	2.027	3.037	4.046	17.67	0.002	1.003	2.005	3.006	4.008
7.67	0.008	1.017	2.026	3.035	4.044	17.83	0.002	1.003	2.005	3.006	4.008
7.83	0.008	1.016	2.025	3.033	4.042	18.00	0.002	1.003	2.005	3.006	4.008
8.00	0.007	1.016	2.024	3.032	4.040	18.17	0.002	1.003	2.005	3.006	4.008
8.17	0.007	1.015	2.023	3.031	4.038	18.33	0.001	1.003	2.004	3.006	4.007
8.33	0.007	1.014	2.022	3.029	4.037	18.50	0.001	1.003	2.004	3.006	4.007
8.50	0.007	1.014	2.021	3.028	4.035	18.67	0.001	1.003	2.004	3.006	4.007
8.67	0.006	1.013	2.020	3.027	4.034	18.83	0.001	1.003	2.004	3.006	4.007
8.83	0.006	1.013	2.019	3.026	4.033	19.00	0.001	1.003	2.004	3.006	4.007
9.00	0.006	1.012	2.019	3.025	4.032	19.17	0.001	1.003	2.004	3.005	4.007
9.17	0.006	1.012	2.018	3.024	4.030	19.33	0.001	1.003	2.004	3.005	4.007
9.33	0.006	1.011	2.017	3.023	4.029	19.50	0.001	1.003	2.004	3.005	4.007
9.50	0.005	1.011	2.017	3.023	4.028	19.67	0.001	1.003	2.004	3.005	4.006
9.67	0.005	1.011	2.016	3.022	4.027	19.83	0.001	1.003	2.004	3.005	4.006
9.83	0.005	1.010	2.016	3.021	4.026	20.00	0.001	1.003	2.004	3.005	4.006
10.00	0.005	1.010	2.015	3.020	4.025	20.17	0.001	1.002	2.004	3.005	4.006
10.17	0.005	1.010	2.015	3.020	4.025	20.33	0.001	1.002	2.004	3.005	4.006
10.33	0.005	1.009	2.014	3.019	4.024	20.50	0.001	1.002	2.004	3.005	4.006
10.50	0.004	1.009	2.014	3.018	4.023	20.67	0.001	1.002	2.004	3.005	4.006
10.67	0.004	1.009	2.013	3.018	4.022	20.83	0.001	1.002	2.003	3.005	4.006
10.83	0.004	1.009	2.013	3.017	4.022	21.00	0.001	1.002	2.003	3.005	4.006
11.00	0.004	1.008	2.012	3.017	4.021						



# A2

## Solução de Kirsch - Deslocamentos

K=0

$\theta$	0		$\theta$	0		$\theta$	0	
r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$
1.5	-5.78E-04	0.00E+00	11.75	-1.34E-04	0.00E+00	22	-7.20E-05	0.00E+00
1.75	-6.04E-04	0.00E+00	12	-1.31E-04	0.00E+00	22.25	-7.12E-05	0.00E+00
2	-5.91E-04	0.00E+00	12.25	-1.29E-04	0.00E+00	22.5	-7.04E-05	0.00E+00
2.25	-5.63E-04	0.00E+00	12.5	-1.26E-04	0.00E+00	22.75	-6.97E-05	0.00E+00
2.5	-5.31E-04	0.00E+00	12.75	-1.24E-04	0.00E+00	23	-6.89E-05	0.00E+00
2.75	-4.99E-04	0.00E+00	13	-1.21E-04	0.00E+00	23.25	-6.82E-05	0.00E+00
3	-4.69E-04	0.00E+00	13.25	-1.19E-04	0.00E+00	23.5	-6.75E-05	0.00E+00
3.25	-4.41E-04	0.00E+00	13.5	-1.17E-04	0.00E+00	23.75	-6.68E-05	0.00E+00
3.5	-4.16E-04	0.00E+00	13.75	-1.15E-04	0.00E+00	24	-6.61E-05	0.00E+00
3.75	-3.93E-04	0.00E+00	14	-1.13E-04	0.00E+00	24.25	-6.54E-05	0.00E+00
4	-3.72E-04	0.00E+00	14.25	-1.11E-04	0.00E+00	24.5	-6.47E-05	0.00E+00
4.25	-3.53E-04	0.00E+00	14.5	-1.09E-04	0.00E+00	24.75	-6.41E-05	0.00E+00
4.5	-3.35E-04	0.00E+00	14.75	-1.07E-04	0.00E+00	25	-6.34E-05	0.00E+00
4.75	-3.19E-04	0.00E+00	15	-1.05E-04	0.00E+00	25.25	-6.28E-05	0.00E+00
5	-3.05E-04	0.00E+00	15.25	-1.04E-04	0.00E+00	25.5	-6.22E-05	0.00E+00
5.25	-2.91E-04	0.00E+00	15.5	-1.02E-04	0.00E+00	25.75	-6.16E-05	0.00E+00
5.5	-2.79E-04	0.00E+00	15.75	-1.00E-04	0.00E+00	26	-6.10E-05	0.00E+00
5.75	-2.68E-04	0.00E+00	16	-9.89E-05	0.00E+00	26.25	-6.04E-05	0.00E+00
6	-2.57E-04	0.00E+00	16.25	-9.74E-05	0.00E+00	26.5	-5.98E-05	0.00E+00
6.25	-2.47E-04	0.00E+00	16.5	-9.59E-05	0.00E+00	26.75	-5.93E-05	0.00E+00
6.5	-2.38E-04	0.00E+00	16.75	-9.45E-05	0.00E+00	27	-5.87E-05	0.00E+00
6.75	-2.30E-04	0.00E+00	17	-9.31E-05	0.00E+00	27.25	-5.82E-05	0.00E+00
7	-2.22E-04	0.00E+00	17.25	-9.18E-05	0.00E+00	27.5	-5.77E-05	0.00E+00
7.25	-2.15E-04	0.00E+00	17.5	-9.05E-05	0.00E+00	27.75	-5.72E-05	0.00E+00
7.5	-2.08E-04	0.00E+00	17.75	-8.92E-05	0.00E+00	28	-5.66E-05	0.00E+00
7.75	-2.01E-04	0.00E+00	18	-8.80E-05	0.00E+00	28.25	-5.61E-05	0.00E+00
8	-1.95E-04	0.00E+00	18.25	-8.68E-05	0.00E+00	28.5	-5.57E-05	0.00E+00
8.25	-1.90E-04	0.00E+00	18.5	-8.56E-05	0.00E+00	28.75	-5.52E-05	0.00E+00
8.5	-1.84E-04	0.00E+00	18.75	-8.45E-05	0.00E+00	29	-5.47E-05	0.00E+00
8.75	-1.79E-04	0.00E+00	19	-8.34E-05	0.00E+00	29.25	-5.42E-05	0.00E+00
9	-1.74E-04	0.00E+00	19.25	-8.23E-05	0.00E+00	29.5	-5.38E-05	0.00E+00
9.25	-1.70E-04	0.00E+00	19.5	-8.12E-05	0.00E+00	29.75	-5.33E-05	0.00E+00

9.5	-1.65E-04	0.00E+00	19.75	-8.02E-05	0.00E+00	30	-5.29E-05	0.00E+00
9.75	-1.61E-04	0.00E+00	20	-7.92E-05	0.00E+00	30.25	-5.24E-05	0.00E+00
10	-1.57E-04	0.00E+00	20.25	-7.82E-05	0.00E+00	30.5	-5.20E-05	0.00E+00
10.25	-1.53E-04	0.00E+00	20.5	-7.73E-05	0.00E+00	30.75	-5.16E-05	0.00E+00
10.5	-1.50E-04	0.00E+00	20.75	-7.64E-05	0.00E+00	31	-5.12E-05	0.00E+00
10.75	-1.46E-04	0.00E+00	21	-7.55E-05	0.00E+00	31.25	-5.08E-05	0.00E+00
11	-1.43E-04	0.00E+00	21.25	-7.46E-05	0.00E+00	31.5	-5.04E-05	0.00E+00
11.25	-1.40E-04	0.00E+00	21.5	-7.37E-05	0.00E+00			
11.5	-1.37E-04	0.00E+00	21.75	-7.29E-05	0.00E+00			

θ	90		θ	90		θ	90	
	r	v θ		r	v θ		r	v θ
1.5	1.54E-03	1.30E-19	11.75	2.57E-04	9.16E-21	22	1.38E-04	4.84E-21
1.75	1.43E-03	9.78E-20	12	2.52E-04	8.96E-21	22.25	1.36E-04	4.79E-21
2	1.31E-03	7.79E-20	12.25	2.47E-04	8.77E-21	22.5	1.35E-04	4.73E-21
2.25	1.20E-03	6.46E-20	12.5	2.42E-04	8.59E-21	22.75	1.33E-04	4.68E-21
2.5	1.11E-03	5.52E-20	12.75	2.37E-04	8.42E-21	23	1.32E-04	4.63E-21
2.75	1.02E-03	4.82E-20	13	2.32E-04	8.25E-21	23.25	1.30E-04	4.58E-21
3	9.51E-04	4.27E-20	13.25	2.28E-04	8.10E-21	23.5	1.29E-04	4.53E-21
3.25	8.86E-04	3.85E-20	13.5	2.24E-04	7.94E-21	23.75	1.28E-04	4.48E-21
3.5	8.28E-04	3.50E-20	13.75	2.20E-04	7.80E-21	24	1.26E-04	4.44E-21
3.75	7.78E-04	3.21E-20	14	2.16E-04	7.65E-21	24.25	1.25E-04	4.39E-21
4	7.33E-04	2.96E-20	14.25	2.12E-04	7.52E-21	24.5	1.24E-04	4.35E-21
4.25	6.92E-04	2.76E-20	14.5	2.09E-04	7.38E-21	24.75	1.22E-04	4.30E-21
4.5	6.56E-04	2.58E-20	14.75	2.05E-04	7.26E-21	25	1.21E-04	4.26E-21
4.75	6.23E-04	2.42E-20	15	2.02E-04	7.13E-21	25.25	1.20E-04	4.22E-21
5	5.93E-04	2.28E-20	15.25	1.98E-04	7.02E-21	25.5	1.19E-04	4.17E-21
5.25	5.66E-04	2.16E-20	15.5	1.95E-04	6.90E-21	25.75	1.18E-04	4.13E-21
5.5	5.42E-04	2.05E-20	15.75	1.92E-04	6.79E-21	26	1.17E-04	4.09E-21
5.75	5.19E-04	1.95E-20	16	1.89E-04	6.68E-21	26.25	1.15E-04	4.05E-21
6	4.98E-04	1.86E-20	16.25	1.86E-04	6.58E-21	26.5	1.14E-04	4.02E-21
6.25	4.78E-04	1.78E-20	16.5	1.83E-04	6.48E-21	26.75	1.13E-04	3.98E-21
6.5	4.61E-04	1.71E-20	16.75	1.81E-04	6.38E-21	27	1.12E-04	3.94E-21
6.75	4.44E-04	1.64E-20	17	1.78E-04	6.28E-21	27.25	1.11E-04	3.90E-21
7	4.28E-04	1.57E-20	17.25	1.75E-04	6.19E-21	27.5	1.10E-04	3.87E-21
7.25	4.14E-04	1.52E-20	17.5	1.73E-04	6.10E-21	27.75	1.09E-04	3.83E-21
7.5	4.00E-04	1.46E-20	17.75	1.71E-04	6.02E-21	28	1.08E-04	3.80E-21
7.75	3.88E-04	1.41E-20	18	1.68E-04	5.93E-21	28.25	1.07E-04	3.77E-21
8	3.76E-04	1.37E-20	18.25	1.66E-04	5.85E-21	28.5	1.06E-04	3.73E-21
8.25	3.65E-04	1.32E-20	18.5	1.64E-04	5.77E-21	28.75	1.05E-04	3.70E-21
8.5	3.54E-04	1.28E-20	18.75	1.61E-04	5.69E-21	29	1.04E-04	3.67E-21
8.75	3.44E-04	1.24E-20	19	1.59E-04	5.62E-21	29.25	1.04E-04	3.64E-21
9	3.35E-04	1.21E-20	19.25	1.57E-04	5.54E-21	29.5	1.03E-04	3.61E-21
9.25	3.26E-04	1.17E-20	19.5	1.55E-04	5.47E-21	29.75	1.02E-04	3.58E-21
9.5	3.17E-04	1.14E-20	19.75	1.53E-04	5.40E-21	30	1.01E-04	3.55E-21
9.75	3.09E-04	1.11E-20	20	1.51E-04	5.33E-21	30.25	1.00E-04	3.52E-21
10	3.02E-04	1.08E-20	20.25	1.50E-04	5.27E-21	30.5	9.94E-05	3.49E-21
10.25	2.94E-04	1.05E-20	20.5	1.48E-04	5.20E-21	30.75	9.85E-05	3.46E-21
10.5	2.87E-04	1.03E-20	20.75	1.46E-04	5.14E-21	31	9.78E-05	3.43E-21
10.75	2.81E-04	1.00E-20	21	1.44E-04	5.08E-21	31.25	9.70E-05	3.40E-21
11	2.74E-04	9.80E-21	21.25	1.43E-04	5.02E-21	31.5	9.62E-05	3.38E-21
11.25	2.68E-04	9.57E-21	21.5	1.41E-04	4.96E-21			
11.5	2.63E-04	9.36E-21	21.75	1.39E-04	4.90E-21			

K=1

$\theta$	0		$\theta$	0		$\theta$	0	
r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$
1.5	9.63E-04	0.00E+00	11.75	1.23E-04	0.00E+00	22	6.56E-05	0.00E+00
1.75	8.25E-04	0.00E+00	12	1.20E-04	0.00E+00	22.25	6.49E-05	0.00E+00
2	7.22E-04	0.00E+00	12.25	1.18E-04	0.00E+00	22.5	6.42E-05	0.00E+00
2.25	6.42E-04	0.00E+00	12.5	1.16E-04	0.00E+00	22.75	6.35E-05	0.00E+00
2.5	5.78E-04	0.00E+00	12.75	1.13E-04	0.00E+00	23	6.28E-05	0.00E+00
2.75	5.25E-04	0.00E+00	13	1.11E-04	0.00E+00	23.25	6.21E-05	0.00E+00
3	4.81E-04	0.00E+00	13.25	1.09E-04	0.00E+00	23.5	6.14E-05	0.00E+00
3.25	4.44E-04	0.00E+00	13.5	1.07E-04	0.00E+00	23.75	6.08E-05	0.00E+00
3.5	4.13E-04	0.00E+00	13.75	1.05E-04	0.00E+00	24	6.02E-05	0.00E+00
3.75	3.85E-04	0.00E+00	14	1.03E-04	0.00E+00	24.25	5.95E-05	0.00E+00
4	3.61E-04	0.00E+00	14.25	1.01E-04	0.00E+00	24.5	5.89E-05	0.00E+00
4.25	3.40E-04	0.00E+00	14.5	9.96E-05	0.00E+00	24.75	5.83E-05	0.00E+00
4.5	3.21E-04	0.00E+00	14.75	9.79E-05	0.00E+00	25	5.78E-05	0.00E+00
4.75	3.04E-04	0.00E+00	15	9.63E-05	0.00E+00	25.25	5.72E-05	0.00E+00
5	2.89E-04	0.00E+00	15.25	9.47E-05	0.00E+00	25.5	5.66E-05	0.00E+00
5.25	2.75E-04	0.00E+00	15.5	9.32E-05	0.00E+00	25.75	5.61E-05	0.00E+00
5.5	2.63E-04	0.00E+00	15.75	9.17E-05	0.00E+00	26	5.55E-05	0.00E+00
5.75	2.51E-04	0.00E+00	16	9.02E-05	0.00E+00	26.25	5.50E-05	0.00E+00
6	2.41E-04	0.00E+00	16.25	8.89E-05	0.00E+00	26.5	5.45E-05	0.00E+00
6.25	2.31E-04	0.00E+00	16.5	8.75E-05	0.00E+00	26.75	5.40E-05	0.00E+00
6.5	2.22E-04	0.00E+00	16.75	8.62E-05	0.00E+00	27	5.35E-05	0.00E+00
6.75	2.14E-04	0.00E+00	17	8.49E-05	0.00E+00	27.25	5.30E-05	0.00E+00
7	2.06E-04	0.00E+00	17.25	8.37E-05	0.00E+00	27.5	5.25E-05	0.00E+00
7.25	1.99E-04	0.00E+00	17.5	8.25E-05	0.00E+00	27.75	5.20E-05	0.00E+00
7.5	1.93E-04	0.00E+00	17.75	8.13E-05	0.00E+00	28	5.16E-05	0.00E+00
7.75	1.86E-04	0.00E+00	18	8.02E-05	0.00E+00	28.25	5.11E-05	0.00E+00
8	1.80E-04	0.00E+00	18.25	7.91E-05	0.00E+00	28.5	5.07E-05	0.00E+00
8.25	1.75E-04	0.00E+00	18.5	7.80E-05	0.00E+00	28.75	5.02E-05	0.00E+00
8.5	1.70E-04	0.00E+00	18.75	7.70E-05	0.00E+00	29	4.98E-05	0.00E+00
8.75	1.65E-04	0.00E+00	19	7.60E-05	0.00E+00	29.25	4.94E-05	0.00E+00
9	1.60E-04	0.00E+00	19.25	7.50E-05	0.00E+00	29.5	4.89E-05	0.00E+00
9.25	1.56E-04	0.00E+00	19.5	7.40E-05	0.00E+00	29.75	4.85E-05	0.00E+00
9.5	1.52E-04	0.00E+00	19.75	7.31E-05	0.00E+00	30	4.81E-05	0.00E+00
9.75	1.48E-04	0.00E+00	20	7.22E-05	0.00E+00	30.25	4.77E-05	0.00E+00
10	1.44E-04	0.00E+00	20.25	7.13E-05	0.00E+00	30.5	4.73E-05	0.00E+00
10.25	1.41E-04	0.00E+00	20.5	7.04E-05	0.00E+00	30.75	4.70E-05	0.00E+00
10.5	1.38E-04	0.00E+00	20.75	6.96E-05	0.00E+00	31	4.66E-05	0.00E+00
10.75	1.34E-04	0.00E+00	21	6.88E-05	0.00E+00	31.25	4.62E-05	0.00E+00
11	1.31E-04	0.00E+00	21.25	6.79E-05	0.00E+00	31.5	4.58E-05	0.00E+00
11.25	1.28E-04	0.00E+00	21.5	6.72E-05	0.00E+00			
11.5	1.26E-04	0.00E+00	21.75	6.64E-05	0.00E+00			

$\theta$	90		$\theta$	90		$\theta$	90	
r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$
1.5	9.63E-04	0.00E+00	11.75	1.23E-04	0.00E+00	22	6.56E-05	0.00E+00
1.75	8.25E-04	0.00E+00	12	1.20E-04	0.00E+00	22.25	6.49E-05	0.00E+00
2	7.22E-04	0.00E+00	12.25	1.18E-04	0.00E+00	22.5	6.42E-05	0.00E+00
2.25	6.42E-04	0.00E+00	12.5	1.16E-04	0.00E+00	22.75	6.35E-05	0.00E+00
2.5	5.78E-04	0.00E+00	12.75	1.13E-04	0.00E+00	23	6.28E-05	0.00E+00
2.75	5.25E-04	0.00E+00	13	1.11E-04	0.00E+00	23.25	6.21E-05	0.00E+00
3	4.81E-04	0.00E+00	13.25	1.09E-04	0.00E+00	23.5	6.14E-05	0.00E+00
3.25	4.44E-04	0.00E+00	13.5	1.07E-04	0.00E+00	23.75	6.08E-05	0.00E+00
3.5	4.13E-04	0.00E+00	13.75	1.05E-04	0.00E+00	24	6.02E-05	0.00E+00
3.75	3.85E-04	0.00E+00	14	1.03E-04	0.00E+00	24.25	5.95E-05	0.00E+00
4	3.61E-04	0.00E+00	14.25	1.01E-04	0.00E+00	24.5	5.89E-05	0.00E+00
4.25	3.40E-04	0.00E+00	14.5	9.96E-05	0.00E+00	24.75	5.83E-05	0.00E+00
4.5	3.21E-04	0.00E+00	14.75	9.79E-05	0.00E+00	25	5.78E-05	0.00E+00
4.75	3.04E-04	0.00E+00	15	9.63E-05	0.00E+00	25.25	5.72E-05	0.00E+00
5	2.89E-04	0.00E+00	15.25	9.47E-05	0.00E+00	25.5	5.66E-05	0.00E+00
5.25	2.75E-04	0.00E+00	15.5	9.32E-05	0.00E+00	25.75	5.61E-05	0.00E+00
5.5	2.63E-04	0.00E+00	15.75	9.17E-05	0.00E+00	26	5.55E-05	0.00E+00
5.75	2.51E-04	0.00E+00	16	9.02E-05	0.00E+00	26.25	5.50E-05	0.00E+00
6	2.41E-04	0.00E+00	16.25	8.89E-05	0.00E+00	26.5	5.45E-05	0.00E+00
6.25	2.31E-04	0.00E+00	16.5	8.75E-05	0.00E+00	26.75	5.40E-05	0.00E+00
6.5	2.22E-04	0.00E+00	16.75	8.62E-05	0.00E+00	27	5.35E-05	0.00E+00
6.75	2.14E-04	0.00E+00	17	8.49E-05	0.00E+00	27.25	5.30E-05	0.00E+00
7	2.06E-04	0.00E+00	17.25	8.37E-05	0.00E+00	27.5	5.25E-05	0.00E+00
7.25	1.99E-04	0.00E+00	17.5	8.25E-05	0.00E+00	27.75	5.20E-05	0.00E+00
7.5	1.93E-04	0.00E+00	17.75	8.13E-05	0.00E+00	28	5.16E-05	0.00E+00
7.75	1.86E-04	0.00E+00	18	8.02E-05	0.00E+00	28.25	5.11E-05	0.00E+00
8	1.80E-04	0.00E+00	18.25	7.91E-05	0.00E+00	28.5	5.07E-05	0.00E+00
8.25	1.75E-04	0.00E+00	18.5	7.80E-05	0.00E+00	28.75	5.02E-05	0.00E+00
8.5	1.70E-04	0.00E+00	18.75	7.70E-05	0.00E+00	29	4.98E-05	0.00E+00
8.75	1.65E-04	0.00E+00	19	7.60E-05	0.00E+00	29.25	4.94E-05	0.00E+00
9	1.60E-04	0.00E+00	19.25	7.50E-05	0.00E+00	29.5	4.89E-05	0.00E+00
9.25	1.56E-04	0.00E+00	19.5	7.40E-05	0.00E+00	29.75	4.85E-05	0.00E+00
9.5	1.52E-04	0.00E+00	19.75	7.31E-05	0.00E+00	30	4.81E-05	0.00E+00
9.75	1.48E-04	0.00E+00	20	7.22E-05	0.00E+00	30.25	4.77E-05	0.00E+00
10	1.44E-04	0.00E+00	20.25	7.13E-05	0.00E+00	30.5	4.73E-05	0.00E+00
10.25	1.41E-04	0.00E+00	20.5	7.04E-05	0.00E+00	30.75	4.70E-05	0.00E+00
10.5	1.38E-04	0.00E+00	20.75	6.96E-05	0.00E+00	31	4.66E-05	0.00E+00
10.75	1.34E-04	0.00E+00	21	6.88E-05	0.00E+00	31.25	4.62E-05	0.00E+00
11	1.31E-04	0.00E+00	21.25	6.79E-05	0.00E+00	31.5	4.58E-05	0.00E+00
11.25	1.28E-04	0.00E+00	21.5	6.72E-05	0.00E+00			
11.5	1.26E-04	0.00E+00	21.75	6.64E-05	0.00E+00			



**K=2**

$\theta$	0		$\theta$	0		$\theta$	0	
r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$
1.5	2.50E-03	0.00E+00	11.75	3.80E-04	0.00E+00	22	2.03E-04	0.00E+00
1.75	2.25E-03	0.00E+00	12	3.72E-04	0.00E+00	22.25	2.01E-04	0.00E+00
2	2.03E-03	0.00E+00	12.25	3.64E-04	0.00E+00	22.5	1.99E-04	0.00E+00
2.25	1.85E-03	0.00E+00	12.5	3.57E-04	0.00E+00	22.75	1.97E-04	0.00E+00
2.5	1.69E-03	0.00E+00	12.75	3.50E-04	0.00E+00	23	1.94E-04	0.00E+00
2.75	1.55E-03	0.00E+00	13	3.44E-04	0.00E+00	23.25	1.92E-04	0.00E+00
3	1.43E-03	0.00E+00	13.25	3.37E-04	0.00E+00	23.5	1.90E-04	0.00E+00
3.25	1.33E-03	0.00E+00	13.5	3.31E-04	0.00E+00	23.75	1.88E-04	0.00E+00
3.5	1.24E-03	0.00E+00	13.75	3.25E-04	0.00E+00	24	1.86E-04	0.00E+00
3.75	1.16E-03	0.00E+00	14	3.19E-04	0.00E+00	24.25	1.84E-04	0.00E+00
4	1.09E-03	0.00E+00	14.25	3.14E-04	0.00E+00	24.5	1.83E-04	0.00E+00
4.25	1.03E-03	0.00E+00	14.5	3.08E-04	0.00E+00	24.75	1.81E-04	0.00E+00
4.5	9.77E-04	0.00E+00	14.75	3.03E-04	0.00E+00	25	1.79E-04	0.00E+00
4.75	9.27E-04	0.00E+00	15	2.98E-04	0.00E+00	25.25	1.77E-04	0.00E+00
5	8.82E-04	0.00E+00	15.25	2.93E-04	0.00E+00	25.5	1.75E-04	0.00E+00
5.25	8.41E-04	0.00E+00	15.5	2.88E-04	0.00E+00	25.75	1.74E-04	0.00E+00
5.5	8.04E-04	0.00E+00	15.75	2.84E-04	0.00E+00	26	1.72E-04	0.00E+00
5.75	7.70E-04	0.00E+00	16	2.79E-04	0.00E+00	26.25	1.70E-04	0.00E+00
6	7.38E-04	0.00E+00	16.25	2.75E-04	0.00E+00	26.5	1.69E-04	0.00E+00
6.25	7.09E-04	0.00E+00	16.5	2.71E-04	0.00E+00	26.75	1.67E-04	0.00E+00
6.5	6.83E-04	0.00E+00	16.75	2.67E-04	0.00E+00	27	1.66E-04	0.00E+00
6.75	6.58E-04	0.00E+00	17	2.63E-04	0.00E+00	27.25	1.64E-04	0.00E+00
7	6.35E-04	0.00E+00	17.25	2.59E-04	0.00E+00	27.5	1.63E-04	0.00E+00
7.25	6.13E-04	0.00E+00	17.5	2.55E-04	0.00E+00	27.75	1.61E-04	0.00E+00
7.5	5.93E-04	0.00E+00	17.75	2.52E-04	0.00E+00	28	1.60E-04	0.00E+00
7.75	5.74E-04	0.00E+00	18	2.48E-04	0.00E+00	28.25	1.58E-04	0.00E+00
8	5.56E-04	0.00E+00	18.25	2.45E-04	0.00E+00	28.5	1.57E-04	0.00E+00
8.25	5.40E-04	0.00E+00	18.5	2.42E-04	0.00E+00	28.75	1.56E-04	0.00E+00
8.5	5.24E-04	0.00E+00	18.75	2.38E-04	0.00E+00	29	1.54E-04	0.00E+00
8.75	5.09E-04	0.00E+00	19	2.35E-04	0.00E+00	29.25	1.53E-04	0.00E+00
9	4.95E-04	0.00E+00	19.25	2.32E-04	0.00E+00	29.5	1.52E-04	0.00E+00
9.25	4.82E-04	0.00E+00	19.5	2.29E-04	0.00E+00	29.75	1.50E-04	0.00E+00
9.5	4.69E-04	0.00E+00	19.75	2.26E-04	0.00E+00	30	1.49E-04	0.00E+00
9.75	4.57E-04	0.00E+00	20	2.24E-04	0.00E+00	30.25	1.48E-04	0.00E+00
10	4.46E-04	0.00E+00	20.25	2.21E-04	0.00E+00	30.5	1.47E-04	0.00E+00
10.25	4.35E-04	0.00E+00	20.5	2.18E-04	0.00E+00	30.75	1.46E-04	0.00E+00
10.5	4.25E-04	0.00E+00	20.75	2.16E-04	0.00E+00	31	1.44E-04	0.00E+00
10.75	4.15E-04	0.00E+00	21	2.13E-04	0.00E+00	31.25	1.43E-04	0.00E+00
11	4.06E-04	0.00E+00	21.25	2.10E-04	0.00E+00	31.5	1.42E-04	0.00E+00
11.25	3.97E-04	0.00E+00	21.5	2.08E-04	0.00E+00			
11.5	3.88E-04	0.00E+00	21.75	2.06E-04	0.00E+00			

$\theta$	90		$\theta$	90		$\theta$	90	
	r	$ur$		$v\theta$	r		$ur$	$v\theta$
1.5	3.85E-04	-1.30E-19	11.75	-1.13E-05	-9.16E-21	22	-6.41E-06	-4.84E-21
1.75	2.21E-04	-9.78E-20	12	-1.11E-05	-8.96E-21	22.25	-6.34E-06	-4.79E-21
2	1.31E-04	-7.79E-20	12.25	-1.09E-05	-8.77E-21	22.5	-6.27E-06	-4.73E-21
2.25	7.84E-05	-6.46E-20	12.5	-1.07E-05	-8.59E-21	22.75	-6.21E-06	-4.68E-21
2.5	4.62E-05	-5.52E-20	12.75	-1.05E-05	-8.42E-21	23	-6.14E-06	-4.63E-21
2.75	2.56E-05	-4.82E-20	13	-1.04E-05	-8.25E-21	23.25	-6.08E-06	-4.58E-21
3	1.20E-05	-4.27E-20	13.25	-1.02E-05	-8.10E-21	23.5	-6.02E-06	-4.53E-21
3.25	2.89E-06	-3.85E-20	13.5	-1.00E-05	-7.94E-21	23.75	-5.96E-06	-4.48E-21
3.5	-3.37E-06	-3.50E-20	13.75	-9.88E-06	-7.80E-21	24	-5.90E-06	-4.44E-21
3.75	-7.70E-06	-3.21E-20	14	-9.72E-06	-7.65E-21	24.25	-5.84E-06	-4.39E-21
4	-1.07E-05	-2.96E-20	14.25	-9.57E-06	-7.52E-21	24.5	-5.78E-06	-4.35E-21
4.25	-1.28E-05	-2.76E-20	14.5	-9.42E-06	-7.38E-21	24.75	-5.73E-06	-4.30E-21
4.5	-1.43E-05	-2.58E-20	14.75	-9.28E-06	-7.26E-21	25	-5.67E-06	-4.26E-21
4.75	-1.52E-05	-2.42E-20	15	-9.14E-06	-7.13E-21	25.25	-5.62E-06	-4.22E-21
5	-1.59E-05	-2.28E-20	15.25	-9.01E-06	-7.02E-21	25.5	-5.56E-06	-4.17E-21
5.25	-1.63E-05	-2.16E-20	15.5	-8.88E-06	-6.90E-21	25.75	-5.51E-06	-4.13E-21
5.5	-1.65E-05	-2.05E-20	15.75	-8.75E-06	-6.79E-21	26	-5.46E-06	-4.09E-21
5.75	-1.66E-05	-1.95E-20	16	-8.63E-06	-6.68E-21	26.25	-5.41E-06	-4.05E-21
6	-1.65E-05	-1.86E-20	16.25	-8.51E-06	-6.58E-21	26.5	-5.36E-06	-4.02E-21
6.25	-1.64E-05	-1.78E-20	16.5	-8.39E-06	-6.48E-21	26.75	-5.31E-06	-3.98E-21
6.5	-1.63E-05	-1.71E-20	16.75	-8.27E-06	-6.38E-21	27	-5.27E-06	-3.94E-21
6.75	-1.61E-05	-1.64E-20	17	-8.16E-06	-6.28E-21	27.25	-5.22E-06	-3.90E-21
7	-1.59E-05	-1.57E-20	17.25	-8.05E-06	-6.19E-21	27.5	-5.17E-06	-3.87E-21
7.25	-1.57E-05	-1.52E-20	17.5	-7.95E-06	-6.10E-21	27.75	-5.13E-06	-3.83E-21
7.5	-1.54E-05	-1.46E-20	17.75	-7.84E-06	-6.02E-21	28	-5.08E-06	-3.80E-21
7.75	-1.51E-05	-1.41E-20	18	-7.74E-06	-5.93E-21	28.25	-5.04E-06	-3.77E-21
8	-1.49E-05	-1.37E-20	18.25	-7.64E-06	-5.85E-21	28.5	-5.00E-06	-3.73E-21
8.25	-1.46E-05	-1.32E-20	18.5	-7.55E-06	-5.77E-21	28.75	-4.95E-06	-3.70E-21
8.5	-1.43E-05	-1.28E-20	18.75	-7.45E-06	-5.69E-21	29	-4.91E-06	-3.67E-21
8.75	-1.41E-05	-1.24E-20	19	-7.36E-06	-5.62E-21	29.25	-4.87E-06	-3.64E-21
9	-1.38E-05	-1.21E-20	19.25	-7.27E-06	-5.54E-21	29.5	-4.83E-06	-3.61E-21
9.25	-1.36E-05	-1.17E-20	19.5	-7.19E-06	-5.47E-21	29.75	-4.79E-06	-3.58E-21
9.5	-1.33E-05	-1.14E-20	19.75	-7.10E-06	-5.40E-21	30	-4.75E-06	-3.55E-21
9.75	-1.31E-05	-1.11E-20	20	-7.02E-06	-5.33E-21	30.25	-4.71E-06	-3.52E-21
10	-1.28E-05	-1.08E-20	20.25	-6.93E-06	-5.27E-21	30.5	-4.68E-06	-3.49E-21
10.25	-1.26E-05	-1.05E-20	20.5	-6.85E-06	-5.20E-21	30.75	-4.64E-06	-3.46E-21
10.5	-1.23E-05	-1.03E-20	20.75	-6.78E-06	-5.14E-21	31	-4.60E-06	-3.43E-21
10.75	-1.21E-05	-1.00E-20	21	-6.70E-06	-5.08E-21	31.25	-4.57E-06	-3.40E-21
11	-1.19E-05	-9.80E-21	21.25	-6.63E-06	-5.02E-21	31.5	-4.53E-06	-3.38E-21
11.25	-1.17E-05	-9.57E-21	21.5	-6.55E-06	-4.96E-21			
11.5	-1.15E-05	-9.36E-21	21.75	-6.48E-06	-4.90E-21			

**K=3**

$\theta$	0		$\theta$	0		$\theta$	0	
r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$
1.5	4.04E-03	0.00E+00	11.75	6.37E-04	0.00E+00	22	3.41E-04	0.00E+00
1.75	3.68E-03	0.00E+00	12	6.24E-04	0.00E+00	22.25	3.37E-04	0.00E+00
2	3.35E-03	0.00E+00	12.25	6.11E-04	0.00E+00	22.5	3.33E-04	0.00E+00
2.25	3.05E-03	0.00E+00	12.5	5.99E-04	0.00E+00	22.75	3.30E-04	0.00E+00
2.5	2.80E-03	0.00E+00	12.75	5.87E-04	0.00E+00	23	3.26E-04	0.00E+00
2.75	2.57E-03	0.00E+00	13	5.76E-04	0.00E+00	23.25	3.23E-04	0.00E+00
3	2.38E-03	0.00E+00	13.25	5.65E-04	0.00E+00	23.5	3.19E-04	0.00E+00
3.25	2.22E-03	0.00E+00	13.5	5.55E-04	0.00E+00	23.75	3.16E-04	0.00E+00
3.5	2.07E-03	0.00E+00	13.75	5.45E-04	0.00E+00	24	3.13E-04	0.00E+00
3.75	1.94E-03	0.00E+00	14	5.35E-04	0.00E+00	24.25	3.09E-04	0.00E+00
4	1.83E-03	0.00E+00	14.25	5.26E-04	0.00E+00	24.5	3.06E-04	0.00E+00
4.25	1.72E-03	0.00E+00	14.5	5.17E-04	0.00E+00	24.75	3.03E-04	0.00E+00
4.5	1.63E-03	0.00E+00	14.75	5.08E-04	0.00E+00	25	3.00E-04	0.00E+00
4.75	1.55E-03	0.00E+00	15	5.00E-04	0.00E+00	25.25	2.97E-04	0.00E+00
5	1.48E-03	0.00E+00	15.25	4.91E-04	0.00E+00	25.5	2.94E-04	0.00E+00
5.25	1.41E-03	0.00E+00	15.5	4.84E-04	0.00E+00	25.75	2.91E-04	0.00E+00
5.5	1.35E-03	0.00E+00	15.75	4.76E-04	0.00E+00	26	2.89E-04	0.00E+00
5.75	1.29E-03	0.00E+00	16	4.68E-04	0.00E+00	26.25	2.86E-04	0.00E+00
6	1.24E-03	0.00E+00	16.25	4.61E-04	0.00E+00	26.5	2.83E-04	0.00E+00
6.25	1.19E-03	0.00E+00	16.5	4.54E-04	0.00E+00	26.75	2.81E-04	0.00E+00
6.5	1.14E-03	0.00E+00	16.75	4.48E-04	0.00E+00	27	2.78E-04	0.00E+00
6.75	1.10E-03	0.00E+00	17	4.41E-04	0.00E+00	27.25	2.75E-04	0.00E+00
7	1.06E-03	0.00E+00	17.25	4.35E-04	0.00E+00	27.5	2.73E-04	0.00E+00
7.25	1.03E-03	0.00E+00	17.5	4.28E-04	0.00E+00	27.75	2.70E-04	0.00E+00
7.5	9.93E-04	0.00E+00	17.75	4.22E-04	0.00E+00	28	2.68E-04	0.00E+00
7.75	9.62E-04	0.00E+00	18	4.17E-04	0.00E+00	28.25	2.66E-04	0.00E+00
8	9.32E-04	0.00E+00	18.25	4.11E-04	0.00E+00	28.5	2.63E-04	0.00E+00
8.25	9.04E-04	0.00E+00	18.5	4.05E-04	0.00E+00	28.75	2.61E-04	0.00E+00
8.5	8.78E-04	0.00E+00	18.75	4.00E-04	0.00E+00	29	2.59E-04	0.00E+00
8.75	8.53E-04	0.00E+00	19	3.95E-04	0.00E+00	29.25	2.57E-04	0.00E+00
9	8.30E-04	0.00E+00	19.25	3.90E-04	0.00E+00	29.5	2.54E-04	0.00E+00
9.25	8.08E-04	0.00E+00	19.5	3.85E-04	0.00E+00	29.75	2.52E-04	0.00E+00
9.5	7.87E-04	0.00E+00	19.75	3.80E-04	0.00E+00	30	2.50E-04	0.00E+00
9.75	7.67E-04	0.00E+00	20	3.75E-04	0.00E+00	30.25	2.48E-04	0.00E+00
10	7.48E-04	0.00E+00	20.25	3.70E-04	0.00E+00	30.5	2.46E-04	0.00E+00
10.25	7.29E-04	0.00E+00	20.5	3.66E-04	0.00E+00	30.75	2.44E-04	0.00E+00
10.5	7.12E-04	0.00E+00	20.75	3.61E-04	0.00E+00	31	2.42E-04	0.00E+00
10.75	6.96E-04	0.00E+00	21	3.57E-04	0.00E+00	31.25	2.40E-04	0.00E+00
11	6.80E-04	0.00E+00	21.25	3.53E-04	0.00E+00	31.5	2.38E-04	0.00E+00
11.25	6.65E-04	0.00E+00	21.5	3.49E-04	0.00E+00			
11.5	6.51E-04	0.00E+00	21.75	3.45E-04	0.00E+00			

$\theta$	90		$\theta$	90		$\theta$	90	
r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$
1.5	-1.93E-04	-2.59E-19	11.75	-1.45E-04	-1.83E-20	22	-7.85E-05	-9.69E-21
1.75	-3.84E-04	-1.96E-19	12	-1.43E-04	-1.79E-20	22.25	-7.76E-05	-9.58E-21
2	-4.60E-04	-1.56E-19	12.25	-1.40E-04	-1.75E-20	22.5	-7.67E-05	-9.47E-21
2.25	-4.85E-04	-1.29E-19	12.5	-1.37E-04	-1.72E-20	22.75	-7.59E-05	-9.36E-21
2.5	-4.85E-04	-1.10E-19	12.75	-1.34E-04	-1.68E-20	23	-7.51E-05	-9.26E-21
2.75	-4.74E-04	-9.63E-20	13	-1.32E-04	-1.65E-20	23.25	-7.43E-05	-9.16E-21
3	-4.57E-04	-8.55E-20	13.25	-1.29E-04	-1.62E-20	23.5	-7.35E-05	-9.06E-21
3.25	-4.38E-04	-7.69E-20	13.5	-1.27E-04	-1.59E-20	23.75	-7.27E-05	-8.97E-21
3.5	-4.19E-04	-6.99E-20	13.75	-1.25E-04	-1.56E-20	24	-7.20E-05	-8.87E-21
3.75	-4.00E-04	-6.42E-20	14	-1.23E-04	-1.53E-20	24.25	-7.12E-05	-8.78E-21
4	-3.82E-04	-5.93E-20	14.25	-1.20E-04	-1.50E-20	24.5	-7.05E-05	-8.69E-21
4.25	-3.65E-04	-5.51E-20	14.5	-1.18E-04	-1.48E-20	24.75	-6.98E-05	-8.60E-21
4.5	-3.49E-04	-5.15E-20	14.75	-1.16E-04	-1.45E-20	25	-6.91E-05	-8.52E-21
4.75	-3.34E-04	-4.84E-20	15	-1.15E-04	-1.43E-20	25.25	-6.84E-05	-8.43E-21
5	-3.21E-04	-4.56E-20	15.25	-1.13E-04	-1.40E-20	25.5	-6.77E-05	-8.35E-21
5.25	-3.08E-04	-4.32E-20	15.5	-1.11E-04	-1.38E-20	25.75	-6.71E-05	-8.27E-21
5.5	-2.95E-04	-4.10E-20	15.75	-1.09E-04	-1.36E-20	26	-6.65E-05	-8.19E-21
5.75	-2.84E-04	-3.90E-20	16	-1.07E-04	-1.34E-20	26.25	-6.58E-05	-8.11E-21
6	-2.74E-04	-3.72E-20	16.25	-1.06E-04	-1.32E-20	26.5	-6.52E-05	-8.03E-21
6.25	-2.64E-04	-3.56E-20	16.5	-1.04E-04	-1.30E-20	26.75	-6.46E-05	-7.96E-21
6.5	-2.55E-04	-3.41E-20	16.75	-1.03E-04	-1.28E-20	27	-6.40E-05	-7.88E-21
6.75	-2.46E-04	-3.27E-20	17	-1.01E-04	-1.26E-20	27.25	-6.34E-05	-7.81E-21
7	-2.38E-04	-3.15E-20	17.25	-9.98E-05	-1.24E-20	27.5	-6.28E-05	-7.74E-21
7.25	-2.30E-04	-3.03E-20	17.5	-9.84E-05	-1.22E-20	27.75	-6.23E-05	-7.67E-21
7.5	-2.23E-04	-2.92E-20	17.75	-9.70E-05	-1.20E-20	28	-6.17E-05	-7.60E-21
7.75	-2.17E-04	-2.82E-20	18	-9.57E-05	-1.19E-20	28.25	-6.12E-05	-7.53E-21
8	-2.10E-04	-2.73E-20	18.25	-9.44E-05	-1.17E-20	28.5	-6.07E-05	-7.47E-21
8.25	-2.04E-04	-2.64E-20	18.5	-9.31E-05	-1.15E-20	28.75	-6.01E-05	-7.40E-21
8.5	-1.99E-04	-2.56E-20	18.75	-9.19E-05	-1.14E-20	29	-5.96E-05	-7.34E-21
8.75	-1.93E-04	-2.49E-20	19	-9.07E-05	-1.12E-20	29.25	-5.91E-05	-7.27E-21
9	-1.88E-04	-2.41E-20	19.25	-8.96E-05	-1.11E-20	29.5	-5.86E-05	-7.21E-21
9.25	-1.83E-04	-2.35E-20	19.5	-8.84E-05	-1.09E-20	29.75	-5.81E-05	-7.15E-21
9.5	-1.79E-04	-2.28E-20	19.75	-8.73E-05	-1.08E-20	30	-5.76E-05	-7.09E-21
9.75	-1.74E-04	-2.22E-20	20	-8.62E-05	-1.07E-20	30.25	-5.72E-05	-7.03E-21
10	-1.70E-04	-2.16E-20	20.25	-8.52E-05	-1.05E-20	30.5	-5.67E-05	-6.97E-21
10.25	-1.66E-04	-2.11E-20	20.5	-8.41E-05	-1.04E-20	30.75	-5.62E-05	-6.92E-21
10.5	-1.62E-04	-2.06E-20	20.75	-8.31E-05	-1.03E-20	31	-5.58E-05	-6.86E-21
10.75	-1.59E-04	-2.01E-20	21	-8.22E-05	-1.02E-20	31.25	-5.53E-05	-6.81E-21
11	-1.55E-04	-1.96E-20	21.25	-8.12E-05	-1.00E-20	31.5	-5.49E-05	-6.75E-21
11.25	-1.52E-04	-1.91E-20	21.5	-8.03E-05	-9.91E-21			
11.5	-1.49E-04	-1.87E-20	21.75	-7.93E-05	-9.80E-21			

**K=4**

$\theta$	0		$\theta$	0		$\theta$	0	
r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$
1.5	5.58E-03	0.00E+00	11.75	8.94E-04	0.00E+00	22	4.79E-04	0.00E+00
1.75	5.11E-03	0.00E+00	12	8.76E-04	0.00E+00	22.25	4.73E-04	0.00E+00
2	4.66E-03	0.00E+00	12.25	8.58E-04	0.00E+00	22.5	4.68E-04	0.00E+00
2.25	4.26E-03	0.00E+00	12.5	8.41E-04	0.00E+00	22.75	4.63E-04	0.00E+00
2.5	3.90E-03	0.00E+00	12.75	8.24E-04	0.00E+00	23	4.58E-04	0.00E+00
2.75	3.60E-03	0.00E+00	13	8.09E-04	0.00E+00	23.25	4.53E-04	0.00E+00
3	3.33E-03	0.00E+00	13.25	7.93E-04	0.00E+00	23.5	4.48E-04	0.00E+00
3.25	3.10E-03	0.00E+00	13.5	7.79E-04	0.00E+00	23.75	4.43E-04	0.00E+00
3.5	2.90E-03	0.00E+00	13.75	7.65E-04	0.00E+00	24	4.39E-04	0.00E+00
3.75	2.72E-03	0.00E+00	14	7.51E-04	0.00E+00	24.25	4.34E-04	0.00E+00
4	2.56E-03	0.00E+00	14.25	7.38E-04	0.00E+00	24.5	4.30E-04	0.00E+00
4.25	2.42E-03	0.00E+00	14.5	7.25E-04	0.00E+00	24.75	4.26E-04	0.00E+00
4.5	2.29E-03	0.00E+00	14.75	7.13E-04	0.00E+00	25	4.21E-04	0.00E+00
4.75	2.17E-03	0.00E+00	15	7.01E-04	0.00E+00	25.25	4.17E-04	0.00E+00
5	2.07E-03	0.00E+00	15.25	6.90E-04	0.00E+00	25.5	4.13E-04	0.00E+00
5.25	1.97E-03	0.00E+00	15.5	6.79E-04	0.00E+00	25.75	4.09E-04	0.00E+00
5.5	1.89E-03	0.00E+00	15.75	6.68E-04	0.00E+00	26	4.05E-04	0.00E+00
5.75	1.81E-03	0.00E+00	16	6.58E-04	0.00E+00	26.25	4.01E-04	0.00E+00
6	1.73E-03	0.00E+00	16.25	6.47E-04	0.00E+00	26.5	3.97E-04	0.00E+00
6.25	1.67E-03	0.00E+00	16.5	6.38E-04	0.00E+00	26.75	3.94E-04	0.00E+00
6.5	1.60E-03	0.00E+00	16.75	6.28E-04	0.00E+00	27	3.90E-04	0.00E+00
6.75	1.55E-03	0.00E+00	17	6.19E-04	0.00E+00	27.25	3.87E-04	0.00E+00
7	1.49E-03	0.00E+00	17.25	6.10E-04	0.00E+00	27.5	3.83E-04	0.00E+00
7.25	1.44E-03	0.00E+00	17.5	6.01E-04	0.00E+00	27.75	3.80E-04	0.00E+00
7.5	1.39E-03	0.00E+00	17.75	5.93E-04	0.00E+00	28	3.76E-04	0.00E+00
7.75	1.35E-03	0.00E+00	18	5.85E-04	0.00E+00	28.25	3.73E-04	0.00E+00
8	1.31E-03	0.00E+00	18.25	5.77E-04	0.00E+00	28.5	3.70E-04	0.00E+00
8.25	1.27E-03	0.00E+00	18.5	5.69E-04	0.00E+00	28.75	3.66E-04	0.00E+00
8.5	1.23E-03	0.00E+00	18.75	5.61E-04	0.00E+00	29	3.63E-04	0.00E+00
8.75	1.20E-03	0.00E+00	19	5.54E-04	0.00E+00	29.25	3.60E-04	0.00E+00
9	1.16E-03	0.00E+00	19.25	5.47E-04	0.00E+00	29.5	3.57E-04	0.00E+00
9.25	1.13E-03	0.00E+00	19.5	5.40E-04	0.00E+00	29.75	3.54E-04	0.00E+00
9.5	1.10E-03	0.00E+00	19.75	5.33E-04	0.00E+00	30	3.51E-04	0.00E+00
9.75	1.08E-03	0.00E+00	20	5.26E-04	0.00E+00	30.25	3.48E-04	0.00E+00
10	1.05E-03	0.00E+00	20.25	5.20E-04	0.00E+00	30.5	3.45E-04	0.00E+00
10.25	1.02E-03	0.00E+00	20.5	5.14E-04	0.00E+00	30.75	3.43E-04	0.00E+00
10.5	1.00E-03	0.00E+00	20.75	5.07E-04	0.00E+00	31	3.40E-04	0.00E+00
10.75	9.77E-04	0.00E+00	21	5.01E-04	0.00E+00	31.25	3.37E-04	0.00E+00
11	9.55E-04	0.00E+00	21.25	4.95E-04	0.00E+00	31.5	3.34E-04	0.00E+00
11.25	9.33E-04	0.00E+00	21.5	4.90E-04	0.00E+00			
11.5	9.13E-04	0.00E+00	21.75	4.84E-04	0.00E+00			

$\theta$	90		$\theta$	90		$\theta$	90	
r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$	r	ur	v $\theta$
1.5	-7.70E-04	-3.89E-19	11.75	-2.80E-04	-2.75E-20	22	-1.50E-04	-1.45E-20
1.75	-9.88E-04	-2.93E-19	12	-2.74E-04	-2.69E-20	22.25	-1.49E-04	-1.44E-20
2	-1.05E-03	-2.34E-19	12.25	-2.68E-04	-2.63E-20	22.5	-1.47E-04	-1.42E-20
2.25	-1.05E-03	-1.94E-19	12.5	-2.63E-04	-2.58E-20	22.75	-1.46E-04	-1.40E-20
2.5	-1.02E-03	-1.66E-19	12.75	-2.58E-04	-2.53E-20	23	-1.44E-04	-1.39E-20
2.75	-9.73E-04	-1.44E-19	13	-2.53E-04	-2.48E-20	23.25	-1.42E-04	-1.37E-20
3	-9.26E-04	-1.28E-19	13.25	-2.49E-04	-2.43E-20	23.5	-1.41E-04	-1.36E-20
3.25	-8.80E-04	-1.15E-19	13.5	-2.44E-04	-2.38E-20	23.75	-1.39E-04	-1.35E-20
3.5	-8.35E-04	-1.05E-19	13.75	-2.40E-04	-2.34E-20	24	-1.38E-04	-1.33E-20
3.75	-7.93E-04	-9.62E-20	14	-2.35E-04	-2.30E-20	24.25	-1.37E-04	-1.32E-20
4	-7.54E-04	-8.89E-20	14.25	-2.31E-04	-2.26E-20	24.5	-1.35E-04	-1.30E-20
4.25	-7.18E-04	-8.27E-20	14.5	-2.27E-04	-2.22E-20	24.75	-1.34E-04	-1.29E-20
4.5	-6.84E-04	-7.73E-20	14.75	-2.24E-04	-2.18E-20	25	-1.33E-04	-1.28E-20
4.75	-6.54E-04	-7.26E-20	15	-2.20E-04	-2.14E-20	25.25	-1.31E-04	-1.26E-20
5	-6.25E-04	-6.85E-20	15.25	-2.16E-04	-2.10E-20	25.5	-1.30E-04	-1.25E-20
5.25	-5.99E-04	-6.48E-20	15.5	-2.13E-04	-2.07E-20	25.75	-1.29E-04	-1.24E-20
5.5	-5.75E-04	-6.15E-20	15.75	-2.10E-04	-2.04E-20	26	-1.27E-04	-1.23E-20
5.75	-5.52E-04	-5.85E-20	16	-2.06E-04	-2.00E-20	26.25	-1.26E-04	-1.22E-20
6	-5.31E-04	-5.58E-20	16.25	-2.03E-04	-1.97E-20	26.5	-1.25E-04	-1.20E-20
6.25	-5.11E-04	-5.34E-20	16.5	-2.00E-04	-1.94E-20	26.75	-1.24E-04	-1.19E-20
6.5	-4.93E-04	-5.12E-20	16.75	-1.97E-04	-1.91E-20	27	-1.23E-04	-1.18E-20
6.75	-4.76E-04	-4.91E-20	17	-1.94E-04	-1.89E-20	27.25	-1.22E-04	-1.17E-20
7	-4.60E-04	-4.72E-20	17.25	-1.92E-04	-1.86E-20	27.5	-1.21E-04	-1.16E-20
7.25	-4.45E-04	-4.55E-20	17.5	-1.89E-04	-1.83E-20	27.75	-1.19E-04	-1.15E-20
7.5	-4.31E-04	-4.39E-20	17.75	-1.86E-04	-1.80E-20	28	-1.18E-04	-1.14E-20
7.75	-4.18E-04	-4.24E-20	18	-1.84E-04	-1.78E-20	28.25	-1.17E-04	-1.13E-20
8	-4.06E-04	-4.10E-20	18.25	-1.81E-04	-1.75E-20	28.5	-1.16E-04	-1.12E-20
8.25	-3.94E-04	-3.97E-20	18.5	-1.79E-04	-1.73E-20	28.75	-1.15E-04	-1.11E-20
8.5	-3.83E-04	-3.84E-20	18.75	-1.76E-04	-1.71E-20	29	-1.14E-04	-1.10E-20
8.75	-3.72E-04	-3.73E-20	19	-1.74E-04	-1.68E-20	29.25	-1.13E-04	-1.09E-20
9	-3.62E-04	-3.62E-20	19.25	-1.72E-04	-1.66E-20	29.5	-1.12E-04	-1.08E-20
9.25	-3.53E-04	-3.52E-20	19.5	-1.70E-04	-1.64E-20	29.75	-1.11E-04	-1.07E-20
9.5	-3.44E-04	-3.42E-20	19.75	-1.68E-04	-1.62E-20	30	-1.11E-04	-1.06E-20
9.75	-3.35E-04	-3.33E-20	20	-1.65E-04	-1.60E-20	30.25	-1.10E-04	-1.05E-20
10	-3.27E-04	-3.24E-20	20.25	-1.63E-04	-1.58E-20	30.5	-1.09E-04	-1.05E-20
10.25	-3.19E-04	-3.16E-20	20.5	-1.61E-04	-1.56E-20	30.75	-1.08E-04	-1.04E-20
10.5	-3.12E-04	-3.08E-20	20.75	-1.59E-04	-1.54E-20	31	-1.07E-04	-1.03E-20
10.75	-3.05E-04	-3.01E-20	21	-1.58E-04	-1.52E-20	31.25	-1.06E-04	-1.02E-20
11	-2.98E-04	-2.94E-20	21.25	-1.56E-04	-1.50E-20	31.5	-1.05E-04	-1.01E-20
11.25	-2.92E-04	-2.87E-20	21.5	-1.54E-04	-1.49E-20			
11.5	-2.86E-04	-2.81E-20	21.75	-1.52E-04	-1.47E-20			



# A3

## Estado Plano de Deformação - Tensões

K=0

r	Direcção Horizontal		r	Direcção Horizontal		r	Direcção Horizontal	
	$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_x$	$\sigma_y$
1.50	116.56	3085.40	11.80	20.82	1010.51	22.11	3.61	1002.18
1.80	255.59	2134.78	12.11	19.77	1010.04	22.41	3.39	1002.01
2.11	318.06	1685.15	12.41	18.71	1009.58	22.71	3.19	1001.83
2.41	311.83	1432.68	12.71	17.66	1009.11	23.02	3.00	1001.67
2.71	283.08	1329.76	13.02	16.71	1008.72	23.32	2.82	1001.49
3.02	250.29	1241.85	13.32	15.80	1008.34	23.62	2.63	1001.32
3.32	215.69	1201.22	13.62	14.91	1007.99	23.92	2.46	1001.15
3.62	181.09	1160.58	13.92	14.20	1007.66	24.23	2.30	1000.97
3.92	153.33	1123.76	14.23	13.56	1007.33	24.53	2.14	1000.78
4.23	142.91	1107.09	14.53	12.83	1007.05	24.83	1.98	1000.60
4.53	128.51	1091.76	14.83	12.26	1006.75	25.14	1.82	1000.41
4.83	112.29	1076.45	15.14	11.71	1006.49	25.44	1.66	1000.20
5.14	98.05	1062.26	15.44	11.12	1006.25	25.74	1.51	999.99
5.44	92.63	1053.72	15.74	10.61	1006.01	26.05	1.37	999.78
5.74	85.56	1046.89	16.05	10.12	1005.77	26.35	1.24	999.57
6.05	78.75	1040.64	16.35	9.61	1005.56	26.65	1.13	999.33
6.35	72.92	1036.65	16.65	9.17	1005.34	26.95	1.02	999.09
6.65	66.79	1032.69	16.95	8.71	1005.13	27.26	0.90	998.85
6.95	61.34	1029.54	17.26	8.28	1004.93	27.56	0.78	998.61
7.26	56.80	1026.63	17.56	7.88	1004.73	27.86	0.66	998.37
7.56	52.20	1024.41	17.86	7.54	1004.55	28.17	0.57	998.09
7.86	47.92	1022.83	18.17	7.18	1004.37	28.47	0.49	997.81
8.17	43.68	1021.22	18.47	6.84	1004.20	28.77	0.41	997.52
8.47	40.98	1019.83	18.77	6.53	1004.03	29.08	0.35	997.20
8.77	38.31	1018.52	19.08	6.22	1003.85	29.38	0.28	996.88
9.08	35.64	1017.21	19.38	5.91	1003.68	29.68	0.21	996.56
9.38	33.63	1015.99	19.68	5.63	1003.51	29.98	0.16	996.20
9.68	31.66	1015.00	19.98	5.35	1003.35	30.29	0.11	995.84
9.98	29.47	1014.20	20.29	5.07	1003.18	30.59	0.07	995.48
10.29	27.53	1013.48	20.59	4.82	1003.02	30.89	0.07	995.18
10.59	25.59	1012.77	20.89	4.57	1002.86	31.20	0.07	994.89
10.89	24.29	1012.06	21.20	4.33	1002.69	31.50	0.07	994.60
11.20	23.14	1011.54	21.50	4.08	1002.53			
11.50	21.98	1011.03	21.80	3.85	1002.36			

r	Direcção Vertical		r	Direcção Vertical		r	Direcção Vertical	
	$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_r$	$\sigma_\theta$
r	$\sigma_y$	$\sigma_x$	11.80	965.79	7.13	22.11	994.37	4.60
1.50	-7.50	-965.06	12.11	967.62	6.90	22.41	994.77	4.69
1.80	65.45	-430.84	12.41	969.49	6.65	22.71	995.07	4.80
2.11	197.06	-168.95	12.71	971.07	6.40	23.02	995.36	4.90
2.41	310.34	-55.45	13.02	972.59	6.14	23.32	995.66	5.00
2.71	413.29	-8.98	13.32	974.15	5.87	23.62	995.93	5.13
3.02	512.20	10.64	13.62	975.49	5.68	23.92	996.22	5.26
3.32	583.61	17.25	13.92	976.74	5.52	24.23	996.49	5.40
3.62	648.39	22.19	14.23	977.96	5.36	24.53	996.74	5.55
3.92	708.39	27.22	14.53	979.01	5.24	24.83	997.01	5.69
4.23	736.92	26.82	14.83	980.06	5.09	25.14	997.26	5.87
4.53	763.40	25.08	15.14	981.10	4.93	25.44	997.49	6.06
4.83	789.87	23.34	15.44	981.99	4.82	25.74	997.73	6.24
5.14	816.34	21.60	15.74	982.87	4.68	26.05	997.96	6.44
5.44	833.19	21.45	16.05	983.72	4.59	26.35	998.14	6.67
5.74	846.73	20.12	16.35	984.53	4.53	26.65	998.33	6.90
6.05	860.26	18.79	16.65	985.35	4.47	26.95	998.51	7.14
6.35	873.80	17.46	16.95	986.01	4.38	27.26	998.68	7.40
6.65	884.40	17.38	17.26	986.61	4.29	27.56	998.85	7.66
6.95	894.58	17.48	17.56	987.22	4.19	27.86	999.00	7.95
7.26	905.01	17.51	17.86	987.85	4.20	28.17	999.14	8.26
7.56	911.28	16.32	18.17	988.52	4.21	28.47	999.27	8.58
7.86	917.40	14.98	18.47	989.17	4.23	28.77	999.39	8.94
8.17	923.40	14.02	18.77	989.70	4.23	29.08	999.51	9.31
8.47	929.33	13.26	19.08	990.23	4.22	29.38	999.61	9.69
8.77	934.57	12.49	19.38	990.70	4.24	29.68	999.70	10.09
9.08	938.65	11.90	19.68	991.15	4.26	29.98	999.78	10.50
9.38	943.16	11.12	19.98	991.62	4.28	30.29	999.84	10.96
9.68	946.99	10.48	20.29	992.07	4.31	30.59	999.91	11.42
9.98	950.23	9.94	20.59	992.53	4.34	30.89	999.93	11.79
10.29	953.48	9.40	20.89	992.96	4.39	31.20	999.94	12.15
10.59	956.39	8.86	21.20	993.30	4.43	31.50	999.96	12.48
10.89	958.99	8.33	21.50	993.65	4.47			
11.20	961.59	7.80	21.80	993.99	4.52			

**K=1**

r	Direcção Horizontal		r	Direcção Horizontal		r	Direcção Horizontal	
	$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_x$	$\sigma_y$
1.50	122.32	2109.45	11.80	986.49	1017.39	22.11	998.04	1006.80
1.80	319.77	1706.82	12.11	987.20	1016.69	22.41	998.17	1006.72
2.11	502.71	1511.57	12.41	987.91	1016.01	22.71	998.29	1006.65
2.41	638.52	1390.64	12.71	988.62	1015.33	23.02	998.40	1006.58
2.71	698.49	1320.62	13.02	989.26	1014.77	23.32	998.51	1006.52
3.02	754.23	1256.51	13.32	989.88	1014.24	23.62	998.62	1006.47
3.32	792.21	1217.75	13.62	990.50	1013.70	23.92	998.72	1006.41
3.62	830.19	1178.99	13.92	991.01	1013.22	24.23	998.81	1006.37
3.92	862.74	1145.67	14.23	991.48	1012.77	24.53	998.90	1006.32
4.23	876.63	1131.28	14.53	991.97	1012.29	24.83	998.99	1006.28
4.53	891.71	1115.39	14.83	992.38	1011.88	25.14	999.08	1006.26
4.83	907.63	1098.51	15.14	992.76	1011.48	25.44	999.16	1006.24
5.14	922.00	1083.48	15.44	993.16	1011.07	25.74	999.25	1006.22
5.44	929.05	1076.76	15.74	993.51	1010.74	26.05	999.32	1006.21
5.74	936.07	1068.95	16.05	993.85	1010.42	26.35	999.39	1006.20
6.05	942.63	1061.67	16.35	994.19	1010.10	26.65	999.45	1006.21
6.35	947.38	1056.41	16.65	994.48	1009.84	26.95	999.51	1006.22
6.65	952.19	1051.15	16.95	994.78	1009.56	27.26	999.57	1006.24
6.95	956.44	1047.15	17.26	995.07	1009.31	27.56	999.63	1006.27
7.26	960.26	1043.65	17.56	995.34	1009.07	27.86	999.69	1006.30
7.56	963.70	1040.44	17.86	995.57	1008.83	28.17	999.73	1006.34
7.86	966.60	1037.66	18.17	995.80	1008.65	28.47	999.77	1006.38
8.17	969.47	1034.84	18.47	996.01	1008.47	28.77	999.81	1006.42
8.47	971.57	1032.71	18.77	996.21	1008.27	29.08	999.84	1006.48
8.77	973.65	1030.58	19.08	996.42	1008.07	29.38	999.88	1006.55
9.08	975.73	1028.44	19.38	996.62	1007.88	29.68	999.91	1006.62
9.38	977.32	1026.73	19.68	996.79	1007.73	29.98	999.93	1006.72
9.68	978.73	1025.26	19.98	996.97	1007.59	30.29	999.95	1006.82
9.98	980.20	1023.86	20.29	997.14	1007.44	30.59	999.97	1006.92
10.29	981.57	1022.69	20.59	997.30	1007.32	30.89	999.97	1007.00
10.59	982.94	1021.53	20.89	997.45	1007.22	31.20	999.97	1007.08
10.89	983.95	1020.46	21.20	997.61	1007.11	31.50	999.98	1007.16
11.20	984.80	1019.44	21.50	997.76	1007.00			
11.50	985.64	1018.41	21.80	997.90	1006.90			

r	Direcção Vertical		r	Direcção Vertical		r	Direcção Vertical	
	$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_r$	$\sigma_\theta$
1.50	137.49	2114.10	11.80	986.42	1017.61	22.11	998.02	1006.79
1.80	319.17	1712.52	12.11	987.20	1016.85	22.41	998.16	1006.71
2.11	512.14	1499.12	12.41	987.98	1016.09	22.71	998.28	1006.64
2.41	623.24	1396.43	12.71	988.65	1015.45	23.02	998.39	1006.57
2.71	697.90	1314.95	13.02	989.29	1014.82	23.32	998.49	1006.50
3.02	757.97	1245.65	13.32	989.95	1014.19	23.62	998.59	1006.45
3.32	796.81	1211.78	13.62	990.51	1013.65	23.92	998.70	1006.39
3.62	831.21	1179.82	13.92	991.00	1013.17	24.23	998.80	1006.35
3.92	863.49	1149.45	14.23	991.48	1012.70	24.53	998.89	1006.31
4.23	878.62	1132.65	14.53	991.92	1012.28	24.83	998.99	1006.28
4.53	892.10	1117.21	14.83	992.35	1011.85	25.14	999.08	1006.26
4.83	905.58	1101.78	15.14	992.77	1011.42	25.44	999.16	1006.25
5.14	919.07	1086.34	15.44	993.13	1011.07	25.74	999.24	1006.23
5.44	927.71	1076.78	15.74	993.49	1010.71	26.05	999.32	1006.22
5.74	934.03	1069.43	16.05	993.83	1010.39	26.35	999.39	1006.22
6.05	940.36	1062.08	16.35	994.16	1010.11	26.65	999.45	1006.22
6.35	946.68	1054.73	16.65	994.49	1009.83	26.95	999.51	1006.21
6.65	951.49	1050.79	16.95	994.75	1009.55	27.26	999.57	1006.23
6.95	956.07	1047.33	17.26	994.99	1009.27	27.56	999.63	1006.26
7.26	960.72	1043.85	17.56	995.23	1009.00	27.86	999.68	1006.29
7.56	963.57	1040.62	17.86	995.48	1008.80	28.17	999.73	1006.33
7.86	966.33	1037.37	18.17	995.75	1008.61	28.47	999.77	1006.38
8.17	968.78	1034.84	18.47	996.00	1008.43	28.77	999.81	1006.44
8.47	971.07	1032.69	18.77	996.22	1008.25	29.08	999.85	1006.50
8.77	973.22	1030.59	19.08	996.43	1008.07	29.38	999.88	1006.57
9.08	975.00	1028.82	19.38	996.61	1007.91	29.68	999.91	1006.65
9.38	976.92	1026.96	19.68	996.78	1007.76	29.98	999.94	1006.72
9.68	978.54	1025.39	19.98	996.96	1007.62	30.29	999.95	1006.81
9.98	979.92	1024.06	20.29	997.14	1007.49	30.59	999.97	1006.90
10.29	981.30	1022.72	20.59	997.31	1007.36	30.89	999.98	1006.98
10.59	982.52	1021.52	20.89	997.48	1007.24	31.20	999.98	1007.06
10.89	983.59	1020.44	21.20	997.61	1007.11	31.50	999.99	1007.13
11.20	984.66	1019.36	21.50	997.75	1006.99			
11.50	985.65	1018.37	21.80	997.88	1006.88			

**K=2**

r	Direcção Horizontal		r	Direcção Horizontal		r	Direcção Horizontal	
	$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_x$	$\sigma_y$
1.50	128.07	1133.60	11.80	1952.15	1024.28	22.11	1992.47	1011.39
1.80	383.96	1278.91	12.11	1954.64	1023.35	22.41	1992.94	1011.41
2.11	687.36	1338.00	12.41	1957.11	1022.44	22.71	1993.38	1011.47
2.41	965.21	1348.59	12.71	1959.59	1021.53	23.02	1993.81	1011.51
2.71	1113.90	1311.47	13.02	1961.81	1020.79	23.32	1994.21	1011.57
3.02	1258.18	1271.16	13.32	1963.96	1020.09	23.62	1994.61	1011.63
3.32	1368.74	1234.27	13.62	1966.09	1019.33	23.92	1994.99	1011.69
3.62	1479.30	1197.39	13.92	1967.83	1018.71	24.23	1995.32	1011.78
3.92	1572.17	1167.55	14.23	1969.39	1018.17	24.53	1995.65	1011.87
4.23	1610.35	1155.46	14.53	1971.09	1017.50	24.83	1995.98	1011.97
4.53	1654.91	1139.00	14.83	1972.49	1016.99	25.14	1996.33	1012.13
4.83	1702.99	1120.56	15.14	1973.81	1016.48	25.44	1996.67	1012.30
5.14	1745.96	1104.69	15.44	1975.19	1015.91	25.74	1997.00	1012.47
5.44	1765.48	1099.79	15.74	1976.40	1015.49	26.05	1997.27	1012.66
5.74	1786.60	1091.02	16.05	1977.57	1015.10	26.35	1997.54	1012.86
6.05	1806.52	1082.71	16.35	1978.76	1014.68	26.65	1997.77	1013.10
6.35	1821.84	1076.18	16.65	1979.80	1014.36	26.95	1997.99	1013.36
6.65	1837.59	1069.63	16.95	1980.84	1014.01	27.26	1998.22	1013.62
6.95	1851.54	1064.79	17.26	1981.86	1013.68	27.56	1998.47	1013.92
7.26	1863.72	1060.69	17.56	1982.79	1013.39	27.86	1998.72	1014.22
7.56	1875.20	1056.49	17.86	1983.60	1013.08	28.17	1998.90	1014.58
7.86	1885.28	1052.46	18.17	1984.41	1012.90	28.47	1999.06	1014.97
8.17	1895.26	1048.41	18.47	1985.19	1012.73	28.77	1999.21	1015.36
8.47	1902.16	1045.56	18.77	1985.90	1012.52	29.08	1999.34	1015.80
8.77	1908.99	1042.61	19.08	1986.61	1012.32	29.38	1999.47	1016.25
9.08	1915.81	1039.66	19.38	1987.33	1012.12	29.68	1999.60	1016.71
9.38	1921.00	1037.48	19.68	1987.97	1011.98	29.98	1999.70	1017.24
9.68	1925.77	1035.55	19.98	1988.60	1011.83	30.29	1999.79	1017.77
9.98	1930.91	1033.54	20.29	1989.23	1011.69	30.59	1999.88	1018.31
10.29	1935.60	1031.92	20.59	1989.80	1011.61	30.89	1999.87	1018.76
10.59	1940.29	1030.29	20.89	1990.35	1011.55	31.20	1999.87	1019.21
10.89	1943.61	1028.86	21.20	1990.90	1011.49	31.50	1999.87	1019.65
11.20	1946.45	1027.33	21.50	1991.44	1011.44			
11.50	1949.30	1025.80	21.80	1991.96	1011.42			

r	Direcção Vertical		r	Direcção Vertical		r	Direcção Vertical	
	$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_r$	$\sigma_\theta$
1.50	282.49	5193.15	11.80	1007.05	2028.09	22.11	1001.67	2008.97
1.80	572.90	3855.88	12.11	1006.77	2026.80	22.41	1001.57	2008.73
2.11	827.22	3167.22	12.41	1006.46	2025.52	22.71	1001.50	2008.48
2.41	936.16	2848.34	12.71	1006.23	2024.48	23.02	1001.43	2008.23
2.71	982.52	2638.88	13.02	1006.00	2023.47	23.32	1001.35	2007.99
3.02	1003.75	2480.64	13.32	1005.76	2022.47	23.62	1001.28	2007.75
3.32	1010.03	2406.29	13.62	1005.53	2021.59	23.92	1001.19	2007.51
3.62	1014.04	2337.41	13.92	1005.26	2020.80	24.23	1001.10	2007.29
3.92	1018.60	2271.64	14.23	1005.01	2020.03	24.53	1001.03	2007.07
4.23	1020.32	2238.44	14.53	1004.84	2019.31	24.83	1000.95	2006.86
4.53	1020.81	2209.32	14.83	1004.65	2018.60	25.14	1000.88	2006.65
4.83	1021.30	2180.19	15.14	1004.45	2017.93	25.44	1000.82	2006.44
5.14	1021.79	2151.07	15.44	1004.29	2017.33	25.74	1000.75	2006.22
5.44	1022.22	2132.11	15.74	1004.11	2016.75	26.05	1000.69	2006.01
5.74	1021.34	2118.75	16.05	1003.94	2016.20	26.35	1000.63	2005.78
6.05	1020.46	2105.38	16.35	1003.78	2015.70	26.65	1000.57	2005.55
6.35	1019.58	2092.02	16.65	1003.61	2015.20	26.95	1000.51	2005.33
6.65	1018.58	2084.19	16.95	1003.48	2014.72	27.26	1000.46	2005.10
6.95	1017.56	2077.16	17.26	1003.35	2014.25	27.56	1000.41	2004.87
7.26	1016.42	2070.16	17.56	1003.23	2013.78	27.86	1000.37	2004.64
7.56	1015.86	2064.89	17.86	1003.11	2013.38	28.17	1000.31	2004.42
7.86	1015.25	2059.76	18.17	1002.97	2012.99	28.47	1000.26	2004.19
8.17	1014.15	2055.66	18.47	1002.84	2012.61	28.77	1000.23	2003.93
8.47	1012.79	2052.12	18.77	1002.73	2012.25	29.08	1000.19	2003.68
8.77	1011.85	2048.70	19.08	1002.63	2011.90	29.38	1000.16	2003.44
9.08	1011.34	2045.73	19.38	1002.53	2011.56	29.68	1000.13	2003.19
9.38	1010.66	2042.79	19.68	1002.42	2011.25	29.98	1000.09	2002.94
9.68	1010.08	2040.30	19.98	1002.30	2010.95	30.29	1000.06	2002.65
9.98	1009.60	2038.18	20.29	1002.20	2010.65	30.59	1000.03	2002.37
10.29	1009.13	2036.06	20.59	1002.10	2010.36	30.89	1000.02	2002.15
10.59	1008.66	2034.20	20.89	1002.00	2010.07	31.20	1000.01	2001.95
10.89	1008.19	2032.56	21.20	1001.92	2009.78	31.50	1000.00	2001.75
11.20	1007.73	2030.92	21.50	1001.84	2009.49			
11.50	1007.33	2029.38	21.80	1001.76	2009.21			



**K=3**

Direcção Horizontal			Direcção Horizontal			Direcção Horizontal		
r	$\sigma_x$	$\sigma_y$	r	$\sigma_x$	$\sigma_y$	r	$\sigma_x$	$\sigma_y$
1.50	133.83	157.64	11.80	2917.81	1031.17	22.11	2986.91	1016.00
1.80	448.14	850.98	12.11	2922.07	1030.01	22.41	2987.74	1016.11
2.11	872.02	1164.43	12.41	2926.32	1028.88	22.71	2988.49	1016.29
2.41	1291.91	1306.54	12.71	2930.56	1027.74	23.02	2989.22	1016.42
2.71	1529.32	1302.32	13.02	2934.37	1026.83	23.32	2989.91	1016.58
3.02	1762.14	1285.81	13.32	2938.04	1025.98	23.62	2990.61	1016.75
3.32	1945.27	1250.80	13.62	2941.69	1025.03	23.92	2991.26	1016.92
3.62	2128.41	1215.79	13.92	2944.65	1024.27	24.23	2991.84	1017.16
3.92	2281.58	1189.45	14.23	2947.32	1023.60	24.53	2992.42	1017.39
4.23	2344.07	1179.65	14.53	2950.24	1022.75	24.83	2993.01	1017.63
4.53	2418.10	1162.62	14.83	2952.62	1022.12	25.14	2993.61	1017.96
4.83	2498.32	1142.62	15.14	2954.87	1021.49	25.44	2994.17	1018.32
5.14	2569.88	1125.91	15.44	2957.23	1020.76	25.74	2994.73	1018.69
5.44	2601.87	1122.82	15.74	2959.30	1020.24	26.05	2995.21	1019.09
5.74	2637.09	1113.07	16.05	2961.29	1019.78	26.35	2995.70	1019.49
6.05	2670.38	1103.73	16.35	2963.34	1019.23	26.65	2996.11	1019.99
6.35	2696.30	1095.92	16.65	2965.11	1018.86	26.95	2996.50	1020.51
6.65	2723.01	1088.07	16.95	2966.91	1018.44	27.26	2996.89	1021.04
6.95	2746.66	1082.39	17.26	2968.66	1018.05	27.56	2997.33	1021.59
7.26	2767.20	1077.68	17.56	2970.25	1017.71	27.86	2997.76	1022.15
7.56	2786.71	1072.50	17.86	2971.64	1017.36	28.17	2998.07	1022.82
7.86	2803.97	1067.25	18.17	2973.03	1017.18	28.47	2998.34	1023.53
8.17	2821.06	1061.99	18.47	2974.37	1017.00	28.77	2998.60	1024.25
8.47	2832.76	1058.41	18.77	2975.59	1016.77	29.08	2998.83	1025.07
8.77	2844.34	1054.64	19.08	2976.80	1016.54	29.38	2999.06	1025.92
9.08	2855.92	1050.88	19.38	2978.01	1016.32	29.68	2999.29	1026.77
9.38	2864.71	1048.23	19.68	2979.11	1016.19	29.98	2999.46	1027.75
9.68	2872.85	1045.83	19.98	2980.20	1016.07	30.29	2999.63	1028.74
9.98	2881.65	1043.24	20.29	2981.28	1015.94	30.59	2999.78	1029.74
10.29	2889.64	1041.15	20.59	2982.26	1015.90	30.89	2999.78	1030.57
10.59	2897.64	1039.06	20.89	2983.22	1015.89	31.20	2999.79	1031.39
10.89	2903.27	1037.27	21.20	2984.17	1015.88	31.50	2999.81	1032.20
11.20	2908.11	1035.23	21.50	2985.12	1015.89			
11.50	2912.95	1033.20	21.80	2986.01	1015.94			

r	Direcção Vertical		r	Direcção Vertical		r	Direcção Vertical	
	$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_r$	$\sigma_\theta$
1.50	427.49	8272.30	11.80	1027.69	3038.58	22.11	1005.31	3011.16
1.80	826.62	5999.24	12.11	1026.35	3036.76	22.41	1004.95	3010.74
2.11	1142.30	4835.31	12.41	1024.94	3034.95	22.71	1004.68	3010.32
2.41	1249.05	4300.25	12.71	1023.80	3033.51	23.02	1004.41	3009.90
2.71	1267.12	3962.83	13.02	1022.69	3032.13	23.32	1004.15	3009.49
3.02	1249.51	3715.65	13.32	1021.54	3030.76	23.62	1003.92	3009.07
3.32	1223.22	3600.83	13.62	1020.53	3029.53	23.92	1003.66	3008.66
3.62	1196.85	3495.06	13.92	1019.51	3028.43	24.23	1003.42	3008.25
3.92	1173.69	3393.90	14.23	1018.53	3027.36	24.53	1003.19	3007.84
4.23	1162.00	3344.28	14.53	1017.74	3026.36	24.83	1002.93	3007.45
4.53	1149.50	3301.46	14.83	1016.93	3025.37	25.14	1002.71	3007.04
4.83	1137.00	3258.63	15.14	1016.10	3024.46	25.44	1002.49	3006.62
5.14	1124.50	3215.80	15.44	1015.40	3023.62	25.74	1002.26	3006.20
5.44	1116.72	3187.43	15.74	1014.71	3022.79	26.05	1002.04	3005.77
5.74	1108.62	3168.06	16.05	1014.04	3022.01	26.35	1001.86	3005.31
6.05	1100.52	3148.68	16.35	1013.41	3021.28	26.65	1001.68	3004.86
6.35	1092.43	3129.31	16.65	1012.77	3020.55	26.95	1001.50	3004.40
6.65	1085.64	3117.61	16.95	1012.24	3019.88	27.26	1001.34	3003.94
6.95	1079.04	3107.01	17.26	1011.73	3019.23	27.56	1001.18	3003.48
7.26	1072.13	3096.49	17.56	1011.23	3018.58	27.86	1001.03	3003.01
7.56	1068.16	3089.19	17.86	1010.74	3017.98	28.17	1000.88	3002.51
7.86	1064.19	3082.16	18.17	1010.19	3017.39	28.47	1000.74	3002.00
8.17	1059.55	3076.49	18.47	1009.67	3016.82	28.77	1000.62	3001.45
8.47	1054.54	3071.56	18.77	1009.25	3016.28	29.08	1000.50	3000.89
8.77	1050.51	3066.81	19.08	1008.83	3015.75	29.38	1000.40	3000.32
9.08	1047.71	3062.66	19.38	1008.44	3015.24	29.68	1000.32	2999.74
9.38	1044.42	3058.62	19.68	1008.06	3014.76	29.98	1000.24	2999.15
9.68	1041.65	3055.21	19.98	1007.65	3014.29	30.29	1000.17	2998.51
9.98	1039.30	3052.30	20.29	1007.27	3013.83	30.59	1000.11	2997.86
10.29	1036.96	3049.39	20.59	1006.88	3013.37	30.89	1000.09	2997.34
10.59	1034.80	3046.86	20.89	1006.51	3012.92	31.20	1000.08	2996.86
10.89	1032.81	3044.67	21.20	1006.22	3012.47	31.50	1000.06	2996.41
11.20	1030.82	3042.48	21.50	1005.93	3012.02			
11.50	1029.02	3040.40	21.80	1005.64	3011.58			

**K=4**

Direcção Horizontal			Direcção Horizontal			Direcção Horizontal		
r	$\sigma_x$	$\sigma_y$	r	$\sigma_x$	$\sigma_y$	r	$\sigma_x$	$\sigma_y$
1.50	139.59	-818.28	11.80	3883.47	1038.04	22.11	3981.33	1020.60
1.80	512.32	423.04	12.11	3889.51	1036.66	22.41	3982.50	1020.82
2.11	1056.66	990.85	12.41	3895.51	1035.31	22.71	3983.56	1021.11
2.41	1618.59	1264.50	12.71	3901.52	1033.96	23.02	3984.60	1021.34
2.71	1944.70	1293.18	13.02	3906.90	1032.87	23.32	3985.59	1021.63
3.02	2266.05	1300.46	13.32	3912.11	1031.85	23.62	3986.58	1021.91
3.32	2521.77	1267.33	13.62	3917.28	1030.69	23.92	3987.52	1022.20
3.62	2777.49	1234.19	13.92	3921.45	1029.78	24.23	3988.34	1022.58
3.92	2990.99	1211.34	14.23	3925.23	1029.00	24.53	3989.16	1022.94
4.23	3077.79	1203.83	14.53	3929.37	1027.95	24.83	3990.00	1023.31
4.53	3181.30	1186.24	14.83	3932.73	1027.22	25.14	3990.85	1023.81
4.83	3293.69	1164.67	15.14	3935.93	1026.47	25.44	3991.66	1024.36
5.14	3393.86	1147.12	15.44	3939.28	1025.59	25.74	3992.46	1024.90
5.44	3438.31	1145.85	15.74	3942.21	1024.98	26.05	3993.14	1025.51
5.74	3487.60	1135.14	16.05	3945.03	1024.45	26.35	3993.83	1026.11
6.05	3534.25	1124.77	16.35	3947.92	1023.81	26.65	3994.41	1026.85
6.35	3570.74	1115.69	16.65	3950.42	1023.39	26.95	3994.97	1027.62
6.65	3608.38	1106.56	16.95	3952.95	1022.90	27.26	3995.53	1028.41
6.95	3641.73	1100.02	17.26	3955.43	1022.46	27.56	3996.16	1029.24
7.26	3670.64	1094.71	17.56	3957.69	1022.07	27.86	3996.79	1030.08
7.56	3698.21	1088.53	17.86	3959.67	1021.66	28.17	3997.24	1031.07
7.86	3722.64	1082.05	18.17	3961.63	1021.46	28.47	3997.63	1032.12
8.17	3746.85	1075.57	18.47	3963.53	1021.28	28.77	3998.01	1033.18
8.47	3763.35	1071.27	18.77	3965.26	1021.02	29.08	3998.35	1034.37
8.77	3779.69	1066.70	19.08	3966.99	1020.79	29.38	3998.67	1035.60
9.08	3796.02	1062.13	19.38	3968.72	1020.55	29.68	3998.99	1036.84
9.38	3808.41	1059.00	19.68	3970.28	1020.43	29.98	3999.23	1038.28
9.68	3819.91	1056.13	19.98	3971.82	1020.31	30.29	3999.47	1039.72
9.98	3832.37	1052.93	20.29	3973.35	1020.19	30.59	3999.68	1041.18
10.29	3843.68	1050.38	20.59	3974.75	1020.18	30.89	3999.67	1042.38
10.59	3854.99	1047.83	20.89	3976.10	1020.24	31.20	3999.67	1043.58
10.89	3862.93	1045.66	21.20	3977.46	1020.29	31.50	3999.68	1044.76
11.20	3869.77	1043.12	21.50	3978.80	1020.36			
11.50	3876.61	1040.57	21.80	3980.07	1020.48			

r	Direcção Vertical		r	Direcção Vertical		r	Direcção Vertical	
	$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_x$	$\sigma_y$		$\sigma_r$	$\sigma_\theta$
1.50	572.48	11351.50	11.80	1048.32	4049.06	22.11	1008.95	4013.35
1.80	1080.34	8142.61	12.11	1045.94	4046.70	22.41	1008.34	4012.78
2.11	1457.38	6503.39	12.41	1043.44	4044.39	22.71	1007.89	4012.18
2.41	1561.96	5752.12	12.71	1041.40	4042.55	23.02	1007.45	4011.59
2.71	1551.75	5286.73	13.02	1039.41	4040.80	23.32	1007.01	4011.00
3.02	1495.29	4950.62	13.32	1037.35	4039.06	23.62	1006.60	4010.40
3.32	1436.43	4795.34	13.62	1035.55	4037.48	23.92	1006.14	4009.81
3.62	1379.69	4652.66	13.92	1033.76	4036.08	24.23	1005.72	4009.22
3.92	1328.81	4516.12	14.23	1032.04	4034.70	24.53	1005.33	4008.63
4.23	1303.72	4450.10	14.53	1030.64	4033.40	24.83	1004.91	4008.05
4.53	1278.22	4393.58	14.83	1029.21	4032.12	25.14	1004.52	4007.44
4.83	1252.73	4337.06	15.14	1027.76	4030.95	25.44	1004.15	4006.82
5.14	1227.24	4280.54	15.44	1026.55	4029.88	25.74	1003.77	4006.21
5.44	1211.25	4242.76	15.74	1025.32	4028.83	26.05	1003.41	4005.57
5.74	1195.94	4217.37	16.05	1024.15	4027.83	26.35	1003.12	4004.88
6.05	1180.64	4191.98	16.35	1023.03	4026.88	26.65	1002.82	4004.19
6.35	1165.33	4166.59	16.65	1021.90	4025.92	26.95	1002.53	4003.50
6.65	1152.74	4151.02	16.95	1020.97	4025.05	27.26	1002.26	4002.78
6.95	1140.54	4136.86	17.26	1020.11	4024.20	27.56	1002.00	4002.07
7.26	1127.85	4122.83	17.56	1019.26	4023.36	27.86	1001.74	4001.33
7.56	1120.47	4113.49	17.86	1018.38	4022.57	28.17	1001.49	4000.57
7.86	1113.14	4104.57	18.17	1017.42	4021.79	28.47	1001.24	3999.78
8.17	1104.95	4097.33	18.47	1016.52	4021.02	28.77	1001.04	3998.92
8.47	1096.28	4091.01	18.77	1015.77	4020.29	29.08	1000.85	3998.05
8.77	1089.15	4084.93	19.08	1015.03	4019.58	29.38	1000.68	3997.17
9.08	1084.06	4079.59	19.38	1014.35	4018.90	29.68	1000.53	3996.28
9.38	1078.17	4074.47	19.68	1013.69	4018.24	29.98	1000.39	3995.37
9.68	1073.20	4070.13	19.98	1012.99	4017.62	30.29	1000.28	3994.36
9.98	1068.99	4066.43	20.29	1012.32	4016.99	30.59	1000.16	3993.37
10.29	1064.78	4062.73	20.59	1011.65	4016.37	30.89	1000.13	3992.56
10.59	1060.93	4059.54	20.89	1011.02	4015.76	31.20	1000.11	3991.80
10.89	1057.41	4056.79	21.20	1010.52	4015.14	31.50	1000.09	3991.09
11.20	1053.89	4054.04	21.50	1010.03	4014.53			
11.50	1050.70	4051.41	21.80	1009.52	4013.93			

# A4

## Estado Plano de Deformação - Deslocamentos

K=0

	Direcção Horizontal	Direcção Vertical		Direcção Horizontal	Direcção Vertical		Direcção Horizontal	Direcção Vertical
r	$\sigma_x$	$\sigma_y$	r	$\sigma_x$	$\sigma_y$	r	$\sigma_x$	$\sigma_y$
1.50	5.64E-04	-1.56E-03	11.80	1.75E-04	-3.62E-04	22.11	1.30E-04	-2.72E-04
1.80	5.92E-04	-1.43E-03	12.11	1.72E-04	-3.57E-04	22.41	1.29E-04	-2.71E-04
2.11	5.76E-04	-1.30E-03	12.41	1.69E-04	-3.51E-04	22.71	1.29E-04	-2.70E-04
2.41	5.37E-04	-1.19E-03	12.71	1.67E-04	-3.47E-04	23.02	1.28E-04	-2.69E-04
2.71	5.07E-04	-1.09E-03	13.02	1.64E-04	-3.42E-04	23.32	1.28E-04	-2.68E-04
3.02	4.76E-04	-9.97E-04	13.32	1.62E-04	-3.38E-04	23.62	1.28E-04	-2.67E-04
3.32	4.48E-04	-9.33E-04	13.62	1.60E-04	-3.34E-04	23.92	1.27E-04	-2.66E-04
3.62	4.19E-04	-8.72E-04	13.92	1.58E-04	-3.29E-04	24.23	1.27E-04	-2.65E-04
3.92	3.94E-04	-8.14E-04	14.23	1.56E-04	-3.25E-04	24.53	1.27E-04	-2.65E-04
4.23	3.79E-04	-7.75E-04	14.53	1.54E-04	-3.22E-04	24.83	1.26E-04	-2.64E-04
4.53	3.59E-04	-7.37E-04	14.83	1.53E-04	-3.19E-04	25.14	1.26E-04	-2.63E-04
4.83	3.38E-04	-7.00E-04	15.14	1.51E-04	-3.15E-04	25.44	1.26E-04	-2.63E-04
5.14	3.19E-04	-6.63E-04	15.44	1.49E-04	-3.13E-04	25.74	1.26E-04	-2.62E-04
5.44	3.08E-04	-6.34E-04	15.74	1.48E-04	-3.09E-04	26.05	1.25E-04	-2.62E-04
5.74	2.94E-04	-6.09E-04	16.05	1.47E-04	-3.07E-04	26.35	1.25E-04	-2.61E-04
6.05	2.82E-04	-5.83E-04	16.35	1.45E-04	-3.04E-04	26.65	1.25E-04	-2.60E-04
6.35	2.73E-04	-5.57E-04	16.65	1.44E-04	-3.02E-04	26.95	1.25E-04	-2.60E-04
6.65	2.64E-04	-5.40E-04	16.95	1.43E-04	-2.99E-04	27.26	1.25E-04	-2.59E-04
6.95	2.55E-04	-5.23E-04	17.26	1.42E-04	-2.97E-04	27.56	1.24E-04	-2.59E-04
7.26	2.47E-04	-5.06E-04	17.56	1.41E-04	-2.95E-04	27.86	1.24E-04	-2.58E-04
7.56	2.39E-04	-4.92E-04	17.86	1.40E-04	-2.93E-04	28.17	1.24E-04	-2.58E-04
7.86	2.32E-04	-4.77E-04	18.17	1.39E-04	-2.91E-04	28.47	1.24E-04	-2.58E-04
8.17	2.25E-04	-4.64E-04	18.47	1.38E-04	-2.89E-04	28.77	1.24E-04	-2.57E-04
8.47	2.20E-04	-4.52E-04	18.77	1.37E-04	-2.87E-04	29.08	1.24E-04	-2.57E-04
8.77	2.14E-04	-4.41E-04	19.08	1.36E-04	-2.85E-04	29.38	1.23E-04	-2.56E-04
9.08	2.09E-04	-4.31E-04	19.38	1.35E-04	-2.84E-04	29.68	1.23E-04	-2.56E-04
9.38	2.04E-04	-4.20E-04	19.68	1.35E-04	-2.82E-04	29.98	1.23E-04	-2.55E-04
9.68	1.99E-04	-4.11E-04	19.98	1.34E-04	-2.80E-04	30.29	1.23E-04	-2.55E-04
9.98	1.95E-04	-4.03E-04	20.29	1.33E-04	-2.79E-04	30.59	1.23E-04	-2.54E-04
10.29	1.91E-04	-3.95E-04	20.59	1.32E-04	-2.78E-04	30.89	1.22E-04	-2.54E-04
10.59	1.87E-04	-3.88E-04	20.89	1.32E-04	-2.76E-04	31.20	1.22E-04	-2.54E-04
10.89	1.84E-04	-3.81E-04	21.20	1.31E-04	-2.75E-04	31.50	1.22E-04	-2.53E-04
11.20	1.81E-04	-3.74E-04	21.50	1.31E-04	-2.74E-04			
11.50	1.78E-04	-3.67E-04	21.80	1.30E-04	-2.73E-04			

**K=1**

	Direcção Horizontal	Direcção Vertical		Direcção Horizontal	Direcção Vertical		Direcção Horizontal	Direcção Vertical
r	$\sigma_x$	$\sigma_y$	r	$\sigma_x$	$\sigma_y$	r	$\sigma_x$	$\sigma_y$
1.50	-9.90E-04	-1.00E-03	11.80	-1.90E-04	-1.90E-04	22.11	-1.40E-04	-1.40E-04
1.80	-8.40E-04	-8.40E-04	12.11	-1.80E-04	-1.90E-04	22.41	-1.40E-04	-1.40E-04
2.11	-7.30E-04	-7.20E-04	12.41	-1.80E-04	-1.80E-04	22.71	-1.40E-04	-1.40E-04
2.41	-6.40E-04	-6.50E-04	12.71	-1.80E-04	-1.80E-04	23.02	-1.40E-04	-1.40E-04
2.71	-5.80E-04	-5.80E-04	13.02	-1.80E-04	-1.80E-04	23.32	-1.40E-04	-1.40E-04
3.02	-5.30E-04	-5.30E-04	13.32	-1.80E-04	-1.80E-04	23.62	-1.40E-04	-1.40E-04
3.32	-4.90E-04	-4.90E-04	13.62	-1.70E-04	-1.70E-04	23.92	-1.40E-04	-1.40E-04
3.62	-4.50E-04	-4.50E-04	13.92	-1.70E-04	-1.70E-04	24.23	-1.40E-04	-1.40E-04
3.92	-4.20E-04	-4.20E-04	14.23	-1.70E-04	-1.70E-04	24.53	-1.40E-04	-1.40E-04
4.23	-4.00E-04	-4.00E-04	14.53	-1.70E-04	-1.70E-04	24.83	-1.40E-04	-1.40E-04
4.53	-3.80E-04	-3.80E-04	14.83	-1.70E-04	-1.70E-04	25.14	-1.40E-04	-1.40E-04
4.83	-3.50E-04	-3.60E-04	15.14	-1.60E-04	-1.60E-04	25.44	-1.40E-04	-1.40E-04
5.14	-3.30E-04	-3.40E-04	15.44	-1.60E-04	-1.60E-04	25.74	-1.40E-04	-1.40E-04
5.44	-3.20E-04	-3.20E-04	15.74	-1.60E-04	-1.60E-04	26.05	-1.40E-04	-1.40E-04
5.74	-3.10E-04	-3.10E-04	16.05	-1.60E-04	-1.60E-04	26.35	-1.40E-04	-1.40E-04
6.05	-3.00E-04	-3.00E-04	16.35	-1.60E-04	-1.60E-04	26.65	-1.40E-04	-1.40E-04
6.35	-2.90E-04	-2.90E-04	16.65	-1.60E-04	-1.60E-04	26.95	-1.40E-04	-1.40E-04
6.65	-2.80E-04	-2.80E-04	16.95	-1.60E-04	-1.60E-04	27.26	-1.30E-04	-1.30E-04
6.95	-2.70E-04	-2.70E-04	17.26	-1.50E-04	-1.60E-04	27.56	-1.30E-04	-1.30E-04
7.26	-2.60E-04	-2.60E-04	17.56	-1.50E-04	-1.50E-04	27.86	-1.30E-04	-1.30E-04
7.56	-2.50E-04	-2.50E-04	17.86	-1.50E-04	-1.50E-04	28.17	-1.30E-04	-1.30E-04
7.86	-2.40E-04	-2.40E-04	18.17	-1.50E-04	-1.50E-04	28.47	-1.30E-04	-1.30E-04
8.17	-2.40E-04	-2.40E-04	18.47	-1.50E-04	-1.50E-04	28.77	-1.30E-04	-1.30E-04
8.47	-2.30E-04	-2.30E-04	18.77	-1.50E-04	-1.50E-04	29.08	-1.30E-04	-1.30E-04
8.77	-2.30E-04	-2.30E-04	19.08	-1.50E-04	-1.50E-04	29.38	-1.30E-04	-1.30E-04
9.08	-2.20E-04	-2.20E-04	19.38	-1.50E-04	-1.50E-04	29.68	-1.30E-04	-1.30E-04
9.38	-2.20E-04	-2.20E-04	19.68	-1.50E-04	-1.50E-04	29.98	-1.30E-04	-1.30E-04
9.68	-2.10E-04	-2.10E-04	19.98	-1.50E-04	-1.50E-04	30.29	-1.30E-04	-1.30E-04
9.98	-2.10E-04	-2.10E-04	20.29	-1.50E-04	-1.50E-04	30.59	-1.30E-04	-1.30E-04
10.29	-2.00E-04	-2.00E-04	20.59	-1.50E-04	-1.50E-04	30.89	-1.30E-04	-1.30E-04
10.59	-2.00E-04	-2.00E-04	20.89	-1.40E-04	-1.40E-04	31.20	-1.30E-04	-1.30E-04
10.89	-2.00E-04	-2.00E-04	21.20	-1.40E-04	-1.40E-04	31.50	-1.30E-04	-1.30E-04
11.20	-1.90E-04	-1.90E-04	21.50	-1.40E-04	-1.40E-04			
11.50	-1.90E-04	-1.90E-04	21.80	-1.40E-04	-1.40E-04			



**K=2**

	Direcção Horizontal	Direcção Vertical		Direcção Horizontal	Direcção Vertical		Direcção Horizontal	Direcção Vertical
r	$\sigma_x$	$\sigma_y$	r	$\sigma_x$	$\sigma_y$	r	$\sigma_x$	$\sigma_y$
1.50	-2.55E-03	-4.30E-04	11.80	-5.50E-04	-1.33E-05	22.11	-4.14E-04	-1.25E-05
1.80	-2.27E-03	-2.50E-04	12.11	-5.42E-04	-1.32E-05	22.41	-4.12E-04	-1.24E-05
2.11	-2.03E-03	-1.50E-04	12.41	-5.34E-04	-1.31E-05	22.71	-4.11E-04	-1.23E-05
2.41	-1.82E-03	-1.10E-04	12.71	-5.26E-04	-1.32E-05	23.02	-4.09E-04	-1.22E-05
2.71	-1.67E-03	-7.61E-05	13.02	-5.19E-04	-1.33E-05	23.32	-4.08E-04	-1.21E-05
3.02	-1.53E-03	-5.37E-05	13.32	-5.13E-04	-1.34E-05	23.62	-4.06E-04	-1.20E-05
3.32	-1.43E-03	-4.29E-05	13.62	-5.06E-04	-1.34E-05	23.92	-4.05E-04	-1.19E-05
3.62	-1.32E-03	-3.33E-05	13.92	-5.01E-04	-1.35E-05	24.23	-4.04E-04	-1.18E-05
3.92	-1.23E-03	-2.39E-05	14.23	-4.95E-04	-1.36E-05	24.53	-4.03E-04	-1.16E-05
4.23	-1.17E-03	-2.03E-05	14.53	-4.90E-04	-1.35E-05	24.83	-4.02E-04	-1.16E-05
4.53	-1.11E-03	-1.78E-05	14.83	-4.85E-04	-1.35E-05	25.14	-4.01E-04	-1.14E-05
4.83	-1.05E-03	-1.53E-05	15.14	-4.80E-04	-1.35E-05	25.44	-4.00E-04	-1.13E-05
5.14	-9.87E-04	-1.28E-05	15.44	-4.75E-04	-1.35E-05	25.74	-3.99E-04	-1.12E-05
5.44	-9.50E-04	-1.12E-05	15.74	-4.71E-04	-1.36E-05	26.05	-3.98E-04	-1.10E-05
5.74	-9.10E-04	-1.21E-05	16.05	-4.67E-04	-1.36E-05	26.35	-3.97E-04	-1.09E-05
6.05	-8.73E-04	-1.29E-05	16.35	-4.63E-04	-1.35E-05	26.65	-3.96E-04	-1.08E-05
6.35	-8.44E-04	-1.38E-05	16.65	-4.59E-04	-1.34E-05	26.95	-3.95E-04	-1.07E-05
6.65	-8.15E-04	-1.32E-05	16.95	-4.55E-04	-1.34E-05	27.26	-3.94E-04	-1.05E-05
6.95	-7.88E-04	-1.23E-05	17.26	-4.52E-04	-1.34E-05	27.56	-3.93E-04	-1.04E-05
7.26	-7.64E-04	-1.16E-05	17.56	-4.48E-04	-1.34E-05	27.86	-3.93E-04	-1.03E-05
7.56	-7.41E-04	-1.20E-05	17.86	-4.45E-04	-1.34E-05	28.17	-3.92E-04	-1.02E-05
7.86	-7.20E-04	-1.25E-05	18.17	-4.42E-04	-1.33E-05	28.47	-3.91E-04	-1.01E-05
8.17	-6.99E-04	-1.26E-05	18.47	-4.40E-04	-1.33E-05	28.77	-3.91E-04	-9.91E-06
8.47	-6.83E-04	-1.24E-05	18.77	-4.37E-04	-1.32E-05	29.08	-3.90E-04	-9.80E-06
8.77	-6.67E-04	-1.24E-05	19.08	-4.34E-04	-1.32E-05	29.38	-3.89E-04	-9.68E-06
9.08	-6.50E-04	-1.25E-05	19.38	-4.32E-04	-1.32E-05	29.68	-3.88E-04	-9.56E-06
9.38	-6.36E-04	-1.29E-05	19.68	-4.29E-04	-1.31E-05	29.98	-3.88E-04	-9.46E-06
9.68	-6.23E-04	-1.30E-05	19.98	-4.27E-04	-1.30E-05	30.29	-3.87E-04	-9.37E-06
9.98	-6.10E-04	-1.29E-05	20.29	-4.25E-04	-1.29E-05	30.59	-3.86E-04	-9.30E-06
10.29	-5.98E-04	-1.27E-05	20.59	-4.23E-04	-1.28E-05	30.89	-3.85E-04	-9.21E-06
10.59	-5.87E-04	-1.28E-05	20.89	-4.21E-04	-1.28E-05	31.20	-3.85E-04	-9.12E-06
10.89	-5.77E-04	-1.31E-05	21.20	-4.19E-04	-1.27E-05	31.50	-3.84E-04	-9.05E-06
11.20	-5.68E-04	-1.33E-05	21.50	-4.17E-04	-1.26E-05			
11.50	-5.59E-04	-1.35E-05	21.80	-4.15E-04	-1.26E-05			

**K=3**

	Direcção Horizontal	Direcção Vertical		Direcção Horizontal	Direcção Vertical		Direcção Horizontal	Direcção Vertical
r	$\sigma_x$	$\sigma_y$	r	$\sigma_x$	$\sigma_y$	r	$\sigma_x$	$\sigma_y$
1.50	-4.11E-03	1.30E-04	11.80	-9.13E-04	1.61E-04	22.11	-6.85E-04	1.17E-04
1.80	-3.70E-03	3.41E-04	12.11	-8.99E-04	1.59E-04	22.41	-6.83E-04	1.17E-04
2.11	-3.34E-03	4.20E-04	12.41	-8.86E-04	1.56E-04	22.71	-6.80E-04	1.16E-04
2.41	-2.99E-03	4.36E-04	12.71	-8.73E-04	1.54E-04	23.02	-6.78E-04	1.16E-04
2.71	-2.76E-03	4.31E-04	13.02	-8.61E-04	1.51E-04	23.32	-6.76E-04	1.16E-04
3.02	-2.54E-03	4.18E-04	13.32	-8.50E-04	1.49E-04	23.62	-6.73E-04	1.16E-04
3.32	-2.36E-03	4.02E-04	13.62	-8.40E-04	1.47E-04	23.92	-6.71E-04	1.15E-04
3.62	-2.19E-03	3.86E-04	13.92	-8.30E-04	1.44E-04	24.23	-6.69E-04	1.15E-04
3.92	-2.03E-03	3.71E-04	14.23	-8.21E-04	1.42E-04	24.53	-6.67E-04	1.15E-04
4.23	-1.95E-03	3.57E-04	14.53	-8.12E-04	1.41E-04	24.83	-6.66E-04	1.15E-04
4.53	-1.85E-03	3.42E-04	14.83	-8.03E-04	1.39E-04	25.14	-6.64E-04	1.15E-04
4.83	-1.74E-03	3.27E-04	15.14	-7.95E-04	1.37E-04	25.44	-6.62E-04	1.14E-04
5.14	-1.64E-03	3.12E-04	15.44	-7.87E-04	1.36E-04	25.74	-6.61E-04	1.14E-04
5.44	-1.58E-03	3.00E-04	15.74	-7.80E-04	1.34E-04	26.05	-6.59E-04	1.14E-04
5.74	-1.51E-03	2.86E-04	16.05	-7.73E-04	1.33E-04	26.35	-6.58E-04	1.14E-04
6.05	-1.45E-03	2.72E-04	16.35	-7.67E-04	1.32E-04	26.65	-6.56E-04	1.14E-04
6.35	-1.40E-03	2.58E-04	16.65	-7.61E-04	1.31E-04	26.95	-6.55E-04	1.14E-04
6.65	-1.35E-03	2.50E-04	16.95	-7.54E-04	1.30E-04	27.26	-6.54E-04	1.14E-04
6.95	-1.31E-03	2.43E-04	17.26	-7.48E-04	1.28E-04	27.56	-6.52E-04	1.14E-04
7.26	-1.27E-03	2.36E-04	17.56	-7.43E-04	1.27E-04	27.86	-6.51E-04	1.14E-04
7.56	-1.23E-03	2.28E-04	17.86	-7.38E-04	1.26E-04	28.17	-6.50E-04	1.14E-04
7.86	-1.20E-03	2.20E-04	18.17	-7.33E-04	1.25E-04	28.47	-6.49E-04	1.14E-04
8.17	-1.16E-03	2.13E-04	18.47	-7.28E-04	1.24E-04	28.77	-6.48E-04	1.14E-04
8.47	-1.13E-03	2.07E-04	18.77	-7.24E-04	1.24E-04	29.08	-6.46E-04	1.14E-04
8.77	-1.11E-03	2.02E-04	19.08	-7.19E-04	1.23E-04	29.38	-6.45E-04	1.14E-04
9.08	-1.08E-03	1.97E-04	19.38	-7.15E-04	1.22E-04	29.68	-6.44E-04	1.14E-04
9.38	-1.06E-03	1.91E-04	19.68	-7.11E-04	1.21E-04	29.98	-6.43E-04	1.13E-04
9.68	-1.03E-03	1.86E-04	19.98	-7.08E-04	1.21E-04	30.29	-6.42E-04	1.13E-04
9.98	-1.01E-03	1.82E-04	20.29	-7.04E-04	1.20E-04	30.59	-6.41E-04	1.13E-04
10.29	-9.93E-04	1.79E-04	20.59	-7.00E-04	1.20E-04	30.89	-6.39E-04	1.13E-04
10.59	-9.75E-04	1.75E-04	20.89	-6.97E-04	1.19E-04	31.20	-6.38E-04	1.13E-04
10.89	-9.58E-04	1.71E-04	21.20	-6.94E-04	1.19E-04	31.50	-6.37E-04	1.13E-04
11.20	-9.43E-04	1.67E-04	21.50	-6.91E-04	1.18E-04			
11.50	-9.28E-04	1.63E-04	21.80	-6.88E-04	1.18E-04			

**K=4**

	Direcção Horizontal	Direcção Vertical		Direcção Horizontal	Direcção Vertical		Direcção Horizontal	Direcção Vertical
r	$\sigma_x$	$\sigma_y$	r	$\sigma_x$	$\sigma_y$	r	$\sigma_x$	$\sigma_y$
1.50	-5.67E-03	6.93E-04	11.80	-1.28E-03	3.35E-04	22.11	-9.57E-04	2.47E-04
1.80	-5.13E-03	9.31E-04	12.11	-1.26E-03	3.30E-04	22.41	-9.53E-04	2.46E-04
2.11	-4.64E-03	9.92E-04	12.41	-1.24E-03	3.25E-04	22.71	-9.50E-04	2.45E-04
2.41	-4.17E-03	9.77E-04	12.71	-1.22E-03	3.21E-04	23.02	-9.46E-04	2.44E-04
2.71	-3.85E-03	9.38E-04	13.02	-1.20E-03	3.16E-04	23.32	-9.43E-04	2.44E-04
3.02	-3.54E-03	8.90E-04	13.32	-1.19E-03	3.11E-04	23.62	-9.41E-04	2.43E-04
3.32	-3.30E-03	8.47E-04	13.62	-1.17E-03	3.07E-04	23.92	-9.38E-04	2.42E-04
3.62	-3.06E-03	8.05E-04	13.92	-1.16E-03	3.02E-04	24.23	-9.35E-04	2.42E-04
3.92	-2.84E-03	7.66E-04	14.23	-1.15E-03	2.98E-04	24.53	-9.32E-04	2.41E-04
4.23	-2.72E-03	7.34E-04	14.53	-1.13E-03	2.95E-04	24.83	-9.29E-04	2.41E-04
4.53	-2.58E-03	7.02E-04	14.83	-1.12E-03	2.92E-04	25.14	-9.27E-04	2.40E-04
4.83	-2.43E-03	6.69E-04	15.14	-1.11E-03	2.88E-04	25.44	-9.25E-04	2.40E-04
5.14	-2.29E-03	6.37E-04	15.44	-1.10E-03	2.85E-04	25.74	-9.23E-04	2.40E-04
5.44	-2.21E-03	6.12E-04	15.74	-1.09E-03	2.82E-04	26.05	-9.21E-04	2.39E-04
5.74	-2.11E-03	5.85E-04	16.05	-1.08E-03	2.80E-04	26.35	-9.18E-04	2.39E-04
6.05	-2.03E-03	5.57E-04	16.35	-1.07E-03	2.77E-04	26.65	-9.17E-04	2.39E-04
6.35	-1.96E-03	5.30E-04	16.65	-1.06E-03	2.75E-04	26.95	-9.15E-04	2.39E-04
6.65	-1.89E-03	5.13E-04	16.95	-1.05E-03	2.73E-04	27.26	-9.13E-04	2.38E-04
6.95	-1.83E-03	4.98E-04	17.26	-1.05E-03	2.70E-04	27.56	-9.11E-04	2.38E-04
7.26	-1.77E-03	4.83E-04	17.56	-1.04E-03	2.68E-04	27.86	-9.09E-04	2.38E-04
7.56	-1.72E-03	4.68E-04	17.86	-1.03E-03	2.66E-04	28.17	-9.08E-04	2.38E-04
7.86	-1.67E-03	4.52E-04	18.17	-1.02E-03	2.64E-04	28.47	-9.06E-04	2.37E-04
8.17	-1.62E-03	4.39E-04	18.47	-1.02E-03	2.62E-04	28.77	-9.05E-04	2.37E-04
8.47	-1.59E-03	4.27E-04	18.77	-1.01E-03	2.60E-04	29.08	-9.03E-04	2.37E-04
8.77	-1.55E-03	4.16E-04	19.08	-1.00E-03	2.59E-04	29.38	-9.01E-04	2.37E-04
9.08	-1.51E-03	4.06E-04	19.38	-9.99E-04	2.57E-04	29.68	-9.00E-04	2.37E-04
9.38	-1.48E-03	3.94E-04	19.68	-9.93E-04	2.56E-04	29.98	-8.98E-04	2.36E-04
9.68	-1.45E-03	3.85E-04	19.98	-9.88E-04	2.54E-04	30.29	-8.97E-04	2.36E-04
9.98	-1.41E-03	3.77E-04	20.29	-9.83E-04	2.53E-04	30.59	-8.95E-04	2.36E-04
10.29	-1.39E-03	3.70E-04	20.59	-9.78E-04	2.52E-04	30.89	-8.93E-04	2.36E-04
10.59	-1.36E-03	3.62E-04	20.89	-9.74E-04	2.51E-04	31.20	-8.92E-04	2.35E-04
10.89	-1.34E-03	3.55E-04	21.20	-9.69E-04	2.50E-04	31.50	-8.90E-04	2.35E-04
11.20	-1.32E-03	3.47E-04	21.50	-9.65E-04	2.49E-04			
11.50	-1.30E-03	3.40E-04	21.80	-9.61E-04	2.48E-04			



# A5

## Modelo Axissimétrico - Cálculo elástico

### Deslocamentos radiais no plano transversal ao eixo do túnel

r	Desloc. Stage 1	Deslo. Stage 5	ur	r	Desloc. Stage 1	Desloc. Stage 5	ur
1.50	-4.81E-04	-1.47E-03	-9.84E-04	16.65	-5.34E-03	-5.43E-03	-8.55E-05
1.80	-5.79E-04	-1.40E-03	-8.22E-04	16.95	-5.44E-03	-5.52E-03	-8.38E-05
2.11	-6.76E-04	-1.39E-03	-7.09E-04	17.26	-5.54E-03	-5.62E-03	-8.21E-05
2.41	-7.73E-04	-1.39E-03	-6.17E-04	17.56	-5.63E-03	-5.71E-03	-8.05E-05
2.71	-8.70E-04	-1.42E-03	-5.54E-04	17.86	-5.73E-03	-5.81E-03	-7.90E-05
3.02	-9.67E-04	-1.47E-03	-5.01E-04	18.17	-5.83E-03	-5.91E-03	-7.76E-05
3.32	-1.06E-03	-1.52E-03	-4.57E-04	18.47	-5.93E-03	-6.00E-03	-7.62E-05
3.62	-1.16E-03	-1.58E-03	-4.21E-04	18.77	-6.02E-03	-6.10E-03	-7.49E-05
3.92	-1.26E-03	-1.65E-03	-3.91E-04	19.08	-6.12E-03	-6.19E-03	-7.37E-05
4.23	-1.36E-03	-1.72E-03	-3.65E-04	19.38	-6.22E-03	-6.29E-03	-7.25E-05
4.53	-1.45E-03	-1.80E-03	-3.42E-04	19.68	-6.31E-03	-6.39E-03	-7.14E-05
4.83	-1.55E-03	-1.87E-03	-3.21E-04	19.98	-6.41E-03	-6.48E-03	-7.03E-05
5.14	-1.65E-03	-1.95E-03	-3.03E-04	20.29	-6.51E-03	-6.58E-03	-6.92E-05
5.44	-1.75E-03	-2.03E-03	-2.87E-04	20.59	-6.61E-03	-6.67E-03	-6.83E-05
5.74	-1.84E-03	-2.12E-03	-2.73E-04	20.89	-6.70E-03	-6.77E-03	-6.73E-05
6.05	-1.94E-03	-2.20E-03	-2.59E-04	21.20	-6.80E-03	-6.87E-03	-6.65E-05
6.35	-2.04E-03	-2.28E-03	-2.47E-04	21.50	-6.90E-03	-6.96E-03	-6.56E-05
6.65	-2.13E-03	-2.37E-03	-2.36E-04	21.80	-7.00E-03	-7.06E-03	-6.49E-05
6.95	-2.23E-03	-2.46E-03	-2.26E-04	22.11	-7.09E-03	-7.16E-03	-6.41E-05
7.26	-2.33E-03	-2.55E-03	-2.16E-04	22.41	-7.19E-03	-7.25E-03	-6.34E-05
7.56	-2.43E-03	-2.63E-03	-2.08E-04	22.71	-7.29E-03	-7.35E-03	-6.28E-05
7.86	-2.52E-03	-2.72E-03	-1.99E-04	23.02	-7.38E-03	-7.45E-03	-6.20E-05
8.17	-2.62E-03	-2.81E-03	-1.92E-04	23.32	-7.48E-03	-7.54E-03	-6.15E-05
8.47	-2.72E-03	-2.90E-03	-1.85E-04	23.62	-7.58E-03	-7.64E-03	-6.09E-05
8.77	-2.81E-03	-2.99E-03	-1.78E-04	23.92	-7.68E-03	-7.74E-03	-6.04E-05
9.08	-2.91E-03	-3.08E-03	-1.71E-04	24.23	-7.77E-03	-7.83E-03	-5.98E-05
9.38	-3.01E-03	-3.17E-03	-1.66E-04	24.53	-7.87E-03	-7.93E-03	-5.94E-05
9.68	-3.11E-03	-3.27E-03	-1.60E-04	24.83	-7.97E-03	-8.03E-03	-5.90E-05
9.98	-3.20E-03	-3.36E-03	-1.54E-04	25.14	-8.07E-03	-8.12E-03	-5.85E-05
10.29	-3.30E-03	-3.45E-03	-1.49E-04	25.44	-8.16E-03	-8.22E-03	-5.81E-05
10.59	-3.40E-03	-3.54E-03	-1.45E-04	25.74	-8.26E-03	-8.32E-03	-5.77E-05
10.89	-3.50E-03	-3.64E-03	-1.40E-04	26.05	-8.36E-03	-8.41E-03	-5.73E-05
11.20	-3.59E-03	-3.73E-03	-1.36E-04	26.35	-8.45E-03	-8.51E-03	-5.70E-05
11.50	-3.69E-03	-3.82E-03	-1.32E-04	26.65	-8.55E-03	-8.61E-03	-5.67E-05
11.80	-3.79E-03	-3.91E-03	-1.28E-04	26.95	-8.65E-03	-8.70E-03	-5.64E-05
12.11	-3.88E-03	-4.01E-03	-1.24E-04	27.26	-8.75E-03	-8.80E-03	-5.61E-05
12.41	-3.98E-03	-4.10E-03	-1.21E-04	27.56	-8.84E-03	-8.90E-03	-5.59E-05
12.71	-4.08E-03	-4.20E-03	-1.17E-04	27.86	-8.94E-03	-9.00E-03	-5.57E-05
13.02	-4.18E-03	-4.29E-03	-1.14E-04	28.17	-9.04E-03	-9.09E-03	-5.54E-05

13.32	-4.27E-03	-4.38E-03	-1.11E-04	28.47	-9.13E-03	-9.19E-03	-5.52E-05
13.62	-4.37E-03	-4.48E-03	-1.08E-04	28.77	-9.23E-03	-9.29E-03	-5.51E-05
13.92	-4.47E-03	-4.57E-03	-1.05E-04	29.08	-9.33E-03	-9.38E-03	-5.49E-05
14.23	-4.56E-03	-4.67E-03	-1.03E-04	29.38	-9.43E-03	-9.48E-03	-5.47E-05
14.53	-4.66E-03	-4.76E-03	-1.00E-04	29.68	-9.52E-03	-9.58E-03	-5.45E-05
14.83	-4.76E-03	-4.86E-03	-9.78E-05	29.98	-9.62E-03	-9.68E-03	-5.44E-05
15.14	-4.86E-03	-4.95E-03	-9.55E-05	30.29	-9.72E-03	-9.77E-03	-5.43E-05
15.44	-4.95E-03	-5.05E-03	-9.32E-05	30.59	-9.82E-03	-9.87E-03	-5.41E-05
15.74	-5.05E-03	-5.14E-03	-9.11E-05	30.89	-9.91E-03	-9.97E-03	-5.40E-05
16.05	-5.15E-03	-5.24E-03	-8.92E-05	31.20	-1.00E-02	-1.01E-02	-5.39E-05
16.35	-5.25E-03	-5.33E-03	-8.73E-05	31.50	-1.01E-02	-1.02E-02	-5.40E-05

### Deslocamentos no alinhamento da parede do túnel

r	Desloc. Stage 1	Deslo. Stage 5	ur	r	Desloc. Stage 1	Desloc. Stage 5	ur
-8.50	-4.81E-04	-1.47E-03	-9.84E-04	2.25	-4.81E-04	-4.92E-04	-1.04E-05
-8.25	-4.81E-04	-1.46E-03	-9.81E-04	2.50	-4.81E-04	-4.88E-04	-6.45E-06
-8.00	-4.81E-04	-1.46E-03	-9.80E-04	2.75	-4.81E-04	-4.85E-04	-3.85E-06
-7.75	-4.81E-04	-1.46E-03	-9.78E-04	3.00	-4.81E-04	-4.83E-04	-1.73E-06
-7.50	-4.81E-04	-1.45E-03	-9.65E-04	3.25	-4.81E-04	-4.82E-04	-3.00E-07
-7.25	-4.81E-04	-1.44E-03	-9.58E-04	3.50	-4.81E-04	-4.80E-04	1.01E-06
-7.00	-4.81E-04	-1.44E-03	-9.56E-04	3.75	-4.81E-04	-4.80E-04	1.75E-06
-6.75	-4.81E-04	-1.44E-03	-9.57E-04	4.00	-4.81E-04	-4.79E-04	2.36E-06
-6.50	-4.81E-04	-1.44E-03	-9.57E-04	4.25	-4.81E-04	-4.79E-04	2.78E-06
-6.25	-4.81E-04	-1.44E-03	-9.57E-04	4.50	-4.81E-04	-4.78E-04	3.05E-06
-6.00	-4.81E-04	-1.44E-03	-9.57E-04	4.75	-4.81E-04	-4.78E-04	3.26E-06
-5.75	-4.81E-04	-1.44E-03	-9.57E-04	5.00	-4.81E-04	-4.78E-04	3.48E-06
-5.50	-4.81E-04	-1.44E-03	-9.57E-04	5.25	-4.81E-04	-4.78E-04	3.58E-06
-5.25	-4.81E-04	-1.44E-03	-9.56E-04	5.50	-4.81E-04	-4.78E-04	3.66E-06
-5.00	-4.81E-04	-1.43E-03	-9.47E-04	5.75	-4.81E-04	-4.78E-04	3.65E-06
-4.75	-4.81E-04	-1.42E-03	-9.39E-04	6.00	-4.81E-04	-4.78E-04	3.66E-06
-4.50	-4.81E-04	-1.42E-03	-9.38E-04	6.25	-4.81E-04	-4.78E-04	3.65E-06
-4.25	-4.81E-04	-1.42E-03	-9.36E-04	6.50	-4.81E-04	-4.78E-04	3.66E-06
-4.00	-4.81E-04	-1.42E-03	-9.34E-04	6.75	-4.81E-04	-4.78E-04	3.62E-06
-3.75	-4.81E-04	-1.41E-03	-9.32E-04	7.00	-4.81E-04	-4.78E-04	3.59E-06
-3.50	-4.81E-04	-1.41E-03	-9.32E-04	7.25	-4.81E-04	-4.78E-04	3.55E-06
-3.25	-4.81E-04	-1.41E-03	-9.30E-04	7.50	-4.81E-04	-4.78E-04	3.52E-06
-3.00	-4.81E-04	-1.41E-03	-9.26E-04	7.75	-4.81E-04	-4.78E-04	3.50E-06
-2.75	-4.81E-04	-1.40E-03	-9.21E-04	8.00	-4.81E-04	-4.78E-04	3.45E-06
-2.50	-4.81E-04	-1.39E-03	-9.04E-04	8.25	-4.81E-04	-4.78E-04	3.40E-06
-2.25	-4.81E-04	-1.37E-03	-8.85E-04	8.50	-4.81E-04	-4.78E-04	3.37E-06
-2.00	-4.81E-04	-1.35E-03	-8.72E-04	8.75	-4.81E-04	-4.78E-04	3.34E-06
-1.75	-4.81E-04	-1.34E-03	-8.57E-04	9.00	-4.81E-04	-4.78E-04	3.31E-06
-1.50	-4.81E-04	-1.32E-03	-8.38E-04	9.25	-4.81E-04	-4.78E-04	3.28E-06
-1.25	-4.81E-04	-1.29E-03	-8.13E-04	9.50	-4.81E-04	-4.78E-04	3.25E-06
-1.00	-4.81E-04	-1.26E-03	-7.78E-04	9.75	-4.81E-04	-4.78E-04	3.22E-06
-0.75	-4.81E-04	-1.21E-03	-7.26E-04	10.00	-4.81E-04	-4.78E-04	3.20E-06
-0.50	-4.81E-04	-1.13E-03	-6.52E-04	10.25	-4.81E-04	-4.78E-04	3.18E-06
-0.25	-4.81E-04	-1.02E-03	-5.36E-04	10.50	-4.81E-04	-4.78E-04	3.16E-06
0.00	-4.81E-04	-7.74E-04	-2.93E-04	10.75	-4.81E-04	-4.78E-04	3.13E-06
0.25	-4.81E-04	-6.61E-04	-1.80E-04	11.00	-4.81E-04	-4.78E-04	3.12E-06
0.50	-4.81E-04	-6.06E-04	-1.25E-04	11.25	-4.81E-04	-4.78E-04	3.11E-06
0.75	-4.81E-04	-5.69E-04	-8.81E-05	11.50	-4.81E-04	-4.78E-04	3.09E-06

1.00	-4.81E-04	-5.44E-04	-6.28E-05	11.75	-4.81E-04	-4.78E-04	3.08E-06
1.25	-4.81E-04	-5.27E-04	-4.56E-05	12.00	-4.81E-04	-4.78E-04	3.07E-06
1.50	-4.81E-04	-5.13E-04	-3.20E-05	12.25	-4.81E-04	-4.78E-04	3.07E-06
1.75	-4.81E-04	-5.04E-04	-2.27E-05	12.50	-4.81E-04	-4.78E-04	3.07E-06
2.00	-4.81E-04	-4.97E-04	-1.56E-05				

**Deslocamentos radiais normalizados em função da relação da distância à frente e do diâmetro**

r/D	ur/uf	r/D	ur/uf	r/D	ur/uf
-2.833	1.00000	-0.417	0.82671	2.000	-0.00373
-2.750	0.99707	-0.333	0.79032	2.083	-0.00371
-2.667	0.99610	-0.250	0.73771	2.167	-0.00372
-2.583	0.99382	-0.167	0.66318	2.250	-0.00368
-2.500	0.98091	-0.083	0.54444	2.333	-0.00365
-2.417	0.97327	0.000	0.29737	2.417	-0.00361
-2.333	0.97180	0.083	0.18302	2.500	-0.00358
-2.250	0.97241	0.167	0.12668	2.583	-0.00355
-2.167	0.97241	0.250	0.08952	2.667	-0.00350
-2.083	0.97298	0.333	0.06385	2.750	-0.00346
-2.000	0.97254	0.417	0.04634	2.833	-0.00343
-1.917	0.97286	0.500	0.03250	2.917	-0.00340
-1.833	0.97317	0.583	0.02310	3.000	-0.00336
-1.750	0.97125	0.667	0.01585	3.083	-0.00333
-1.667	0.96211	0.750	0.01056	3.167	-0.00331
-1.583	0.95477	0.833	0.00656	3.250	-0.00328
-1.500	0.95351	0.917	0.00391	3.333	-0.00325
-1.417	0.95168	1.000	0.00176	3.417	-0.00323
-1.333	0.94936	1.083	0.00030	3.500	-0.00321
-1.250	0.94747	1.167	-0.00102	3.583	-0.00319
-1.167	0.94692	1.250	-0.00178	3.667	-0.00317
-1.083	0.94521	1.333	-0.00240	3.750	-0.00316
-1.000	0.94107	1.417	-0.00282	3.833	-0.00314
-0.917	0.93619	1.500	-0.00310	3.917	-0.00313
-0.833	0.91901	1.583	-0.00331	4.000	-0.00312
-0.750	0.89945	1.667	-0.00354	4.083	-0.00312
-0.667	0.88624	1.750	-0.00364	4.167	-0.00312
-0.583	0.87160	1.833	-0.00372		
-0.500	0.85221	1.917	-0.00371		





# A6

## Modelo Axissimétrico - Cálculo plástico

**Deslocamento da face do tubo de betão no sentido do empurre, face às forças de empurre**

x	2 MN/m <sup>2</sup>	5 MN/m <sup>2</sup>	10 MN/m <sup>2</sup>	20 MN/m <sup>2</sup>	30 MN/m <sup>2</sup>	40 MN/m <sup>2</sup>	50 MN/m <sup>2</sup>
0.000	-1.74E-04	-7.04E-04	-1.91E-03	-6.64E-03	-1.89E-02	-4.68E-02	-1.12E-01
0.016	-1.74E-04	-7.04E-04	-1.91E-03	-6.66E-03	-1.90E-02	-4.84E-02	-1.18E-01
0.032	-1.74E-04	-7.04E-04	-1.91E-03	-6.67E-03	-1.92E-02	-4.99E-02	-1.25E-01
0.047	-1.74E-04	-7.04E-04	-1.91E-03	-6.68E-03	-1.92E-02	-5.05E-02	-1.28E-01
0.063	-1.74E-04	-7.04E-04	-1.91E-03	-6.69E-03	-1.92E-02	-5.05E-02	-1.28E-01
0.079	-1.74E-04	-7.04E-04	-1.91E-03	-6.69E-03	-1.92E-02	-5.06E-02	-1.28E-01
0.095	-1.74E-04	-7.04E-04	-1.91E-03	-6.70E-03	-1.92E-02	-5.08E-02	-1.29E-01
0.111	-1.74E-04	-7.03E-04	-1.91E-03	-6.70E-03	-1.93E-02	-5.10E-02	-1.30E-01
0.126	-1.74E-04	-7.03E-04	-1.91E-03	-6.71E-03	-1.93E-02	-5.10E-02	-1.31E-01
0.142	-1.74E-04	-7.02E-04	-1.91E-03	-6.71E-03	-1.93E-02	-5.11E-02	-1.31E-01
0.158	-1.74E-04	-7.02E-04	-1.91E-03	-6.71E-03	-1.93E-02	-5.11E-02	-1.31E-01
0.174	-1.73E-04	-7.01E-04	-1.91E-03	-6.71E-03	-1.93E-02	-5.11E-02	-1.31E-01
0.189	-1.73E-04	-7.00E-04	-1.91E-03	-6.72E-03	-1.93E-02	-5.11E-02	-1.31E-01
0.205	-1.73E-04	-6.99E-04	-1.91E-03	-6.72E-03	-1.93E-02	-5.11E-02	-1.31E-01
0.221	-1.73E-04	-6.98E-04	-1.90E-03	-6.72E-03	-1.93E-02	-5.10E-02	-1.31E-01
0.237	-1.72E-04	-6.97E-04	-1.90E-03	-6.72E-03	-1.93E-02	-5.10E-02	-1.31E-01
0.253	-1.72E-04	-6.96E-04	-1.90E-03	-6.72E-03	-1.93E-02	-5.09E-02	-1.30E-01
0.268	-1.72E-04	-6.94E-04	-1.90E-03	-6.72E-03	-1.92E-02	-5.03E-02	-1.28E-01
0.284	-1.71E-04	-6.93E-04	-1.89E-03	-6.70E-03	-1.90E-02	-4.89E-02	-1.23E-01
0.300	-1.71E-04	-6.91E-04	-1.89E-03	-6.69E-03	-1.88E-02	-4.75E-02	-1.18E-01

**Deslocamento absoluto, pontual médio do tubo, no sentido do empurre, em função da carga de empurre**

F [MN/m <sup>2</sup> ]	2	5	10	20	30	40	50
u [m]	0.000174	0.000702	0.001909	0.006704	0.019246	0.050848	0.129759

### Tensões de corte mobilizadas ao longo da superfície do tubo, em função dos diversos carregamentos

Dist. [m]	$\tau$ [MPa]						
	2 MN/m <sup>2</sup>	5 MN/m <sup>2</sup>	10 MN/m <sup>2</sup>	20 MN/m <sup>2</sup>	30 MN/m <sup>2</sup>	40 MN/m <sup>2</sup>	50 MN/m <sup>2</sup>
0.000	0.00369	0.02455	0.03027	0.18600	0.25118	0.21019	0.14812
0.051	0.01810	0.04882	0.24445	0.38684	0.37898	0.38169	0.38850
0.101	0.02075	0.08566	0.37265	0.41982	0.41324	0.40287	0.39839
0.152	0.04852	0.11198	0.39313	0.42002	0.41143	0.39397	0.36865
0.202	0.07091	0.13560	0.38902	0.42456	0.42340	0.41914	0.39569
0.253	0.04546	0.16919	0.38139	0.42417	0.42854	0.41753	0.39220
0.303	0.05450	0.17891	0.37897	0.41941	0.41925	0.40455	0.38626
0.354	0.08885	0.21118	0.37779	0.42013	0.41996	0.40596	0.39963
0.404	0.10213	0.22166	0.37707	0.41445	0.40773	0.37793	0.36173
0.455	0.11482	0.23220	0.37322	0.41475	0.42190	0.41238	0.42600
0.505	0.11491	0.23329	0.36938	0.41437	0.41645	0.42252	0.44310
0.556	0.11259	0.23426	0.36672	0.41126	0.40840	0.41219	0.42286
0.606	0.11699	0.23825	0.36429	0.40720	0.40876	0.39919	0.41624
0.657	0.12085	0.24291	0.36139	0.40586	0.40974	0.40247	0.41571
0.707	0.13269	0.24914	0.35958	0.40481	0.41360	0.41999	0.43150
0.758	0.13983	0.24881	0.35801	0.40225	0.40650	0.40566	0.41291
0.808	0.14160	0.24750	0.35616	0.40034	0.40427	0.40302	0.41440
0.859	0.14976	0.24906	0.35422	0.39913	0.40928	0.40988	0.42945
0.909	0.15228	0.24928	0.35219	0.39666	0.40779	0.40551	0.41594
0.960	0.15032	0.24838	0.35098	0.39623	0.41494	0.42791	0.47763
1.010	0.14209	0.24913	0.34883	0.39352	0.40356	0.39962	0.44423
1.061	0.13173	0.25218	0.34616	0.39119	0.39818	0.39202	0.43756
1.111	0.13031	0.25371	0.34380	0.38991	0.40406	0.41436	0.46726
1.162	0.13243	0.25121	0.34224	0.38773	0.40141	0.41003	0.43828
1.212	0.13720	0.24911	0.34125	0.38566	0.39861	0.40994	0.44755
1.263	0.13792	0.24603	0.34000	0.38378	0.39559	0.40328	0.43745
1.313	0.14504	0.24655	0.33912	0.38321	0.39912	0.40603	0.44364
1.364	0.14611	0.24622	0.33816	0.38235	0.39901	0.40899	0.45495
1.414	0.14740	0.24660	0.33705	0.38038	0.39161	0.39952	0.44900
1.465	0.14651	0.24567	0.33551	0.37910	0.39145	0.41488	0.46155
1.515	0.13550	0.24417	0.33273	0.37659	0.38479	0.39160	0.41671
1.566	0.12512	0.24468	0.33048	0.37380	0.38747	0.40304	0.44458
1.616	0.12073	0.24528	0.32922	0.37276	0.38825	0.40898	0.45490
1.667	0.12870	0.24526	0.32859	0.37169	0.38907	0.41742	0.47677
1.717	0.12607	0.24036	0.32756	0.37036	0.38698	0.41494	0.47691
1.768	0.13060	0.23967	0.32676	0.36865	0.38398	0.40183	0.44674
1.818	0.13014	0.23719	0.32572	0.36717	0.38159	0.39493	0.43790
1.869	0.13687	0.23826	0.32514	0.36652	0.38333	0.39524	0.44999
1.919	0.13656	0.23875	0.32438	0.36536	0.38196	0.39338	0.44086
1.970	0.13154	0.23683	0.32390	0.36571	0.38382	0.39905	0.46725
2.020	0.12065	0.23184	0.32239	0.36461	0.38229	0.40304	0.49183
2.071	0.11198	0.22767	0.32020	0.36134	0.37628	0.40506	0.50728
2.121	0.10895	0.22653	0.31946	0.36066	0.37787	0.41817	0.53313
2.172	0.10934	0.22507	0.31873	0.35712	0.36628	0.38168	0.45940
2.222	0.11175	0.22513	0.31744	0.35791	0.37896	0.40360	0.47510
2.273	0.11607	0.22542	0.31671	0.35565	0.37360	0.39417	0.46376
2.323	0.11663	0.22381	0.31563	0.35375	0.37056	0.38739	0.46482
2.374	0.12124	0.22577	0.31504	0.35402	0.37375	0.39472	0.47863
2.424	0.12100	0.22588	0.31472	0.35504	0.37823	0.40744	0.49721
2.475	0.11689	0.22307	0.31448	0.35568	0.38554	0.43735	0.56421

2.525	0.10508	0.21339	0.31184	0.35040	0.37574	0.42547	0.54368
2.576	0.09755	0.20858	0.31046	0.34845	0.36967	0.41467	0.51936
2.626	0.09603	0.20894	0.30985	0.34794	0.36850	0.41018	0.52206
2.677	0.09493	0.20862	0.30901	0.34677	0.36824	0.40325	0.50849
2.727	0.10334	0.21357	0.30869	0.34708	0.37030	0.41230	0.51044
2.778	0.10228	0.21106	0.30779	0.34598	0.36867	0.41424	0.51521
2.828	0.10523	0.21131	0.30713	0.34475	0.36383	0.39888	0.49926
2.879	0.10665	0.21160	0.30645	0.34142	0.35651	0.37143	0.43438
2.929	0.10567	0.20998	0.30703	0.34593	0.37099	0.40702	0.53107
2.980	0.10042	0.20504	0.30664	0.34529	0.37319	0.42376	0.57313
3.030	0.08836	0.19432	0.30401	0.33634	0.34440	0.35898	0.41964
3.081	0.08290	0.19053	0.30285	0.34179	0.36671	0.43409	0.60299
3.131	0.08155	0.18970	0.30180	0.34096	0.36534	0.42339	0.56883
3.182	0.08571	0.19379	0.30116	0.33987	0.36495	0.41410	0.54413
3.232	0.08301	0.19093	0.30016	0.33821	0.36263	0.41149	0.54443
3.283	0.08713	0.19422	0.29973	0.33628	0.35580	0.40225	0.54166
3.333	0.08824	0.19374	0.29895	0.33459	0.35021	0.39232	0.52657
3.384	0.08988	0.19474	0.29847	0.33602	0.35701	0.39149	0.51738
3.434	0.08791	0.19203	0.29857	0.33429	0.35185	0.39709	0.54663
3.485	0.08420	0.18811	0.29881	0.33603	0.37159	0.43796	0.61593
3.535	0.07121	0.17582	0.29652	0.32919	0.35283	0.40874	0.55676
3.586	0.06473	0.16995	0.29463	0.32946	0.35013	0.41147	0.56277
3.636	0.06678	0.17214	0.29437	0.33525	0.37476	0.46958	0.68730
3.687	0.06422	0.16944	0.29381	0.33367	0.37096	0.46810	0.69182
3.737	0.06702	0.17202	0.29331	0.32802	0.34643	0.41756	0.59910
3.788	0.06773	0.17262	0.29273	0.32722	0.33354	0.39015	0.54177
3.838	0.06945	0.17427	0.29251	0.32923	0.33595	0.39209	0.55404
3.889	0.07086	0.17508	0.29250	0.33020	0.34558	0.41148	0.59600
3.939	0.06870	0.17243	0.29308	0.33553	0.36779	0.45000	0.68218
3.990	0.06160	0.16527	0.29258	0.33623	0.37916	0.47395	0.73229
4.040	0.04789	0.15170	0.29062	0.32455	0.34348	0.40946	0.60178
4.091	0.04311	0.14687	0.28993	0.32968	0.36573	0.46233	0.72521
4.141	0.04047	0.14405	0.28961	0.32979	0.36249	0.45982	0.72928
4.192	0.03955	0.14298	0.28819	0.32658	0.35352	0.44565	0.70556
4.242	0.04484	0.14827	0.28780	0.32345	0.34301	0.42900	0.66876
4.293	0.04043	0.14369	0.28750	0.32206	0.33793	0.42077	0.64743
4.343	0.04312	0.14630	0.28794	0.32666	0.35228	0.45228	0.70829
4.394	0.04102	0.14414	0.28952	0.33252	0.37896	0.48542	0.78851
4.444	0.03754	0.14069	0.29122	0.33127	0.38071	0.49409	0.81899
4.495	0.02991	0.13330	0.28922	0.33541	0.40072	0.53581	0.90537
4.545	0.01651	0.11944	0.28557	0.33660	0.40142	0.55376	0.95425
4.596	0.01226	0.11587	0.28359	0.32577	0.39757	0.55320	0.95802
4.646	0.00881	0.11264	0.28387	0.32568	0.38912	0.52529	0.90930
4.697	0.01359	0.11906	0.28303	0.32642	0.39134	0.51937	0.92214
4.747	0.01924	0.11847	0.27744	0.30669	0.36154	0.46791	0.77603
4.798	0.02461	0.11646	0.27306	0.28363	0.33373	0.43337	0.68361
4.848	0.01589	0.11598	0.28093	0.26377	0.33834	0.47368	0.82764
4.899	0.01075	0.11522	0.27987	0.28062	0.33922	0.43879	0.69969
4.949	0.01825	0.11883	0.27869	0.29694	0.41105	0.50381	0.90664
5.000	0.01825	0.11883	0.27869	0.29694	0.41105	0.50381	0.90664

