

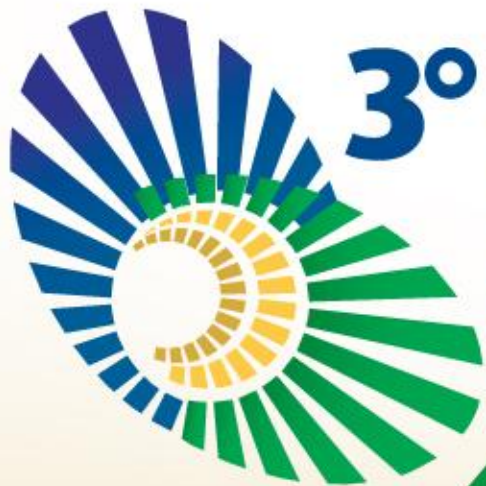


**3º CONGRESSO BRASILEIRO
DE TÚNEIS E ESTRUTURAS
SUBTERRÂNEAS
SEMINÁRIO INTERNACIONAL
"SOUTH AMERICAN
TUNNELLING - SAT 2012"**

20 a 22 de março de 2012 / São Paulo - SP

PROJETO DE TÚNEIS: NOTAS SOBRE O PASSADO, PRESENTE E FUTURO





**3º CONGRESSO BRASILEIRO
DE TÚNEIS E ESTRUTURAS
SUBTERRÂNEAS
SEMINÁRIO INTERNACIONAL
"SOUTH AMERICAN
TUNNELLING - SAT 2012"**

20 a 22 de março de 2012 / São Paulo - SP

Prof. Dr. Carlos Eduardo Moreira Maffei



Índice

1- Histórico

2- Conceitos Atuais

3- A Representatividade dos Modelos de Cálculo

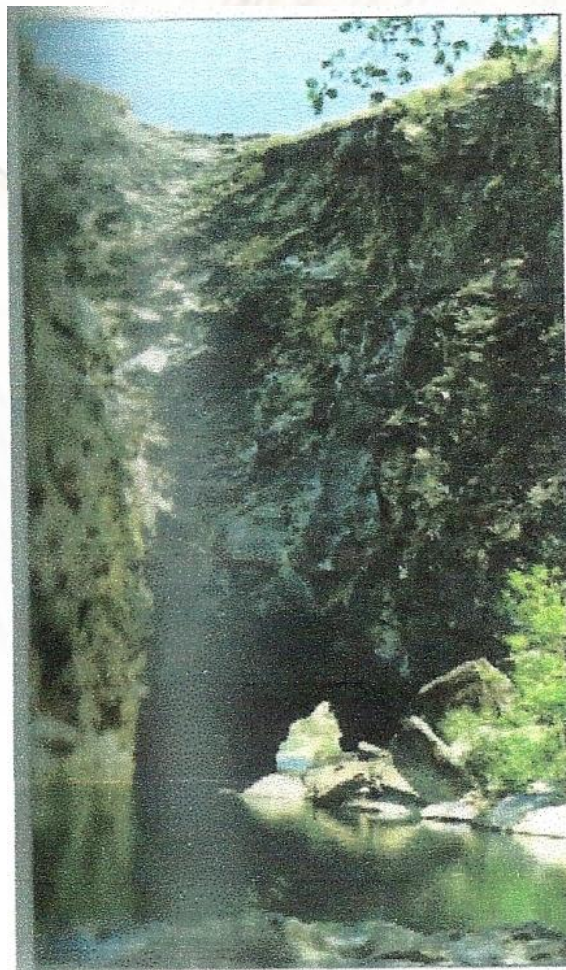


1-HISTÓRICO

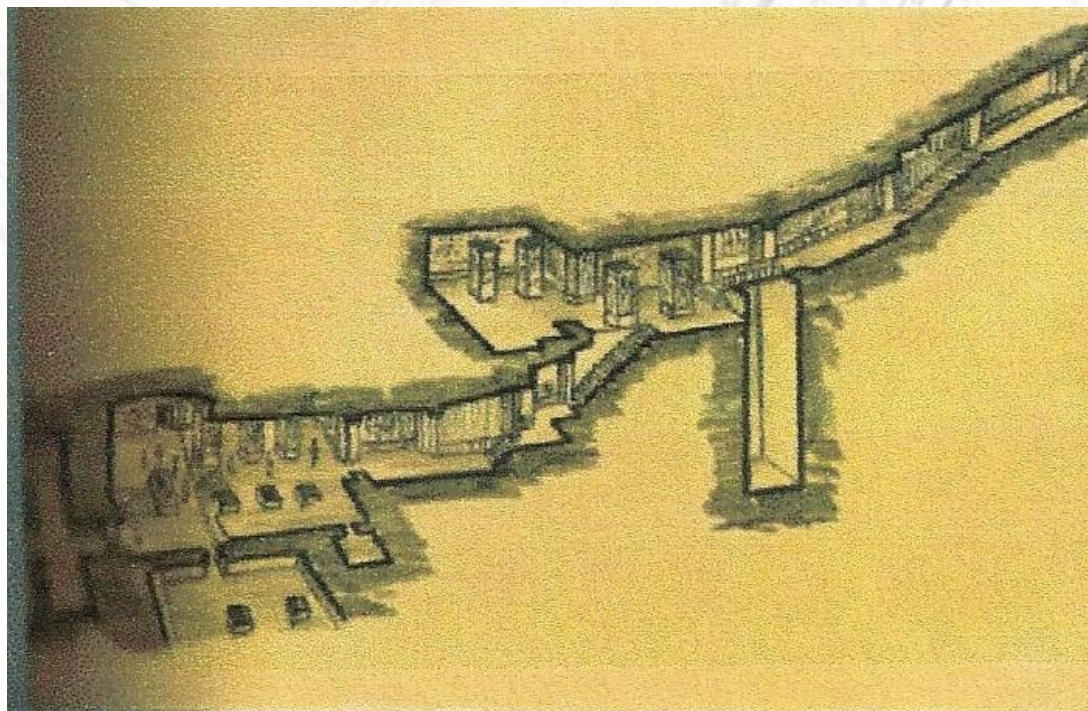
- 40.000 aC mina Cerro do Bomvu, África
- 2.900 aC mina Cobre Sinai
- 1000 aC minas na Áustria
- 1400 dC mina Biber 5,6 km
- 1450 dC Col di tenda Nice-Genova
- 1475 dC Galleria de Buco (Alpes)
- Túneis em rocha

Encharcamento de madeira

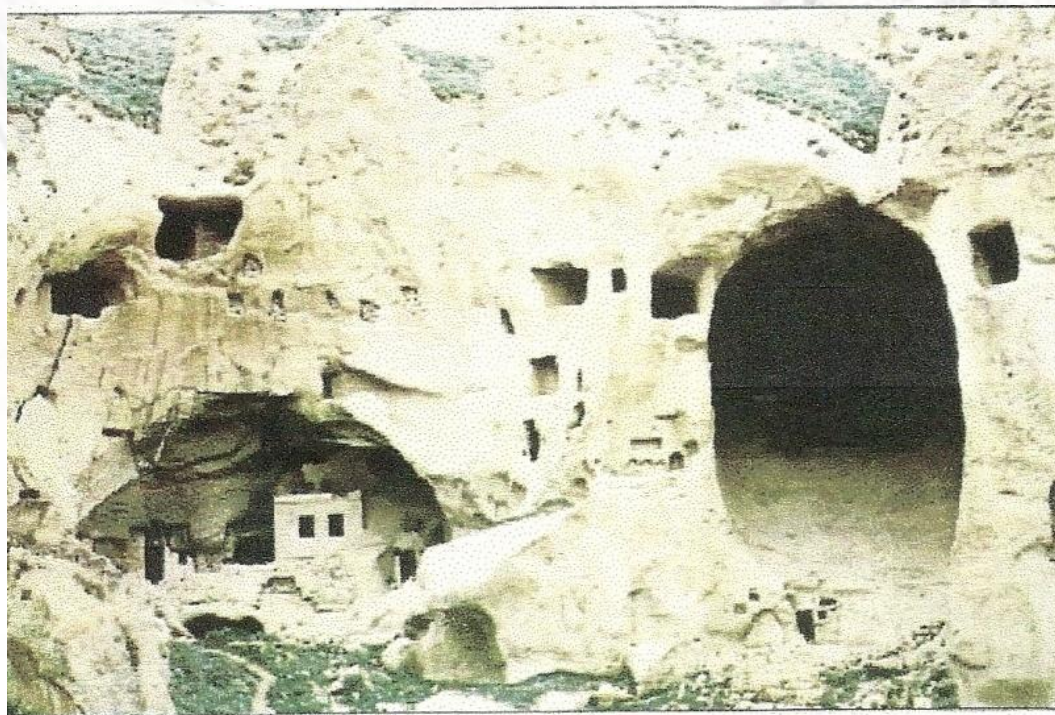
Fogo e resfriamento



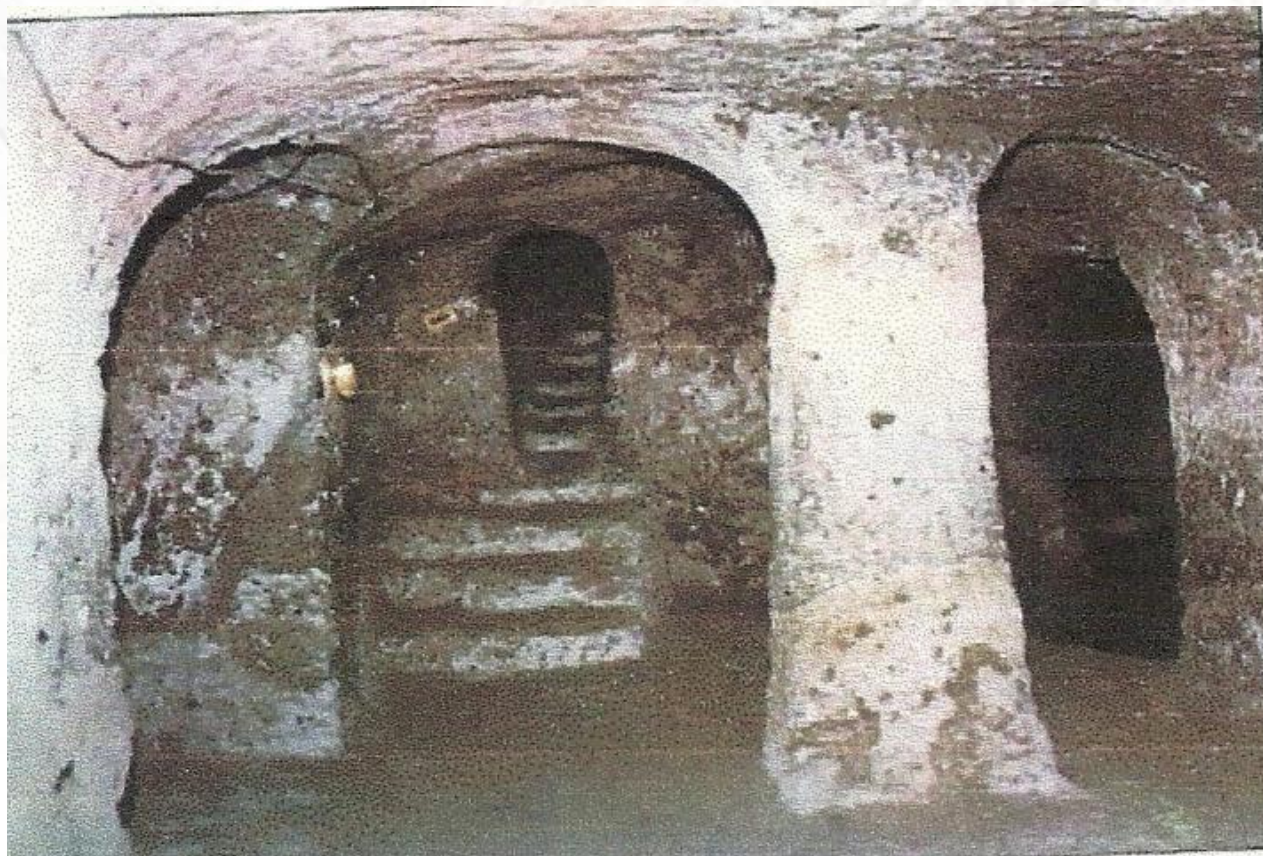
Tunél de Montefurado entrada oeste (Ubierna J.A.J., 1990)



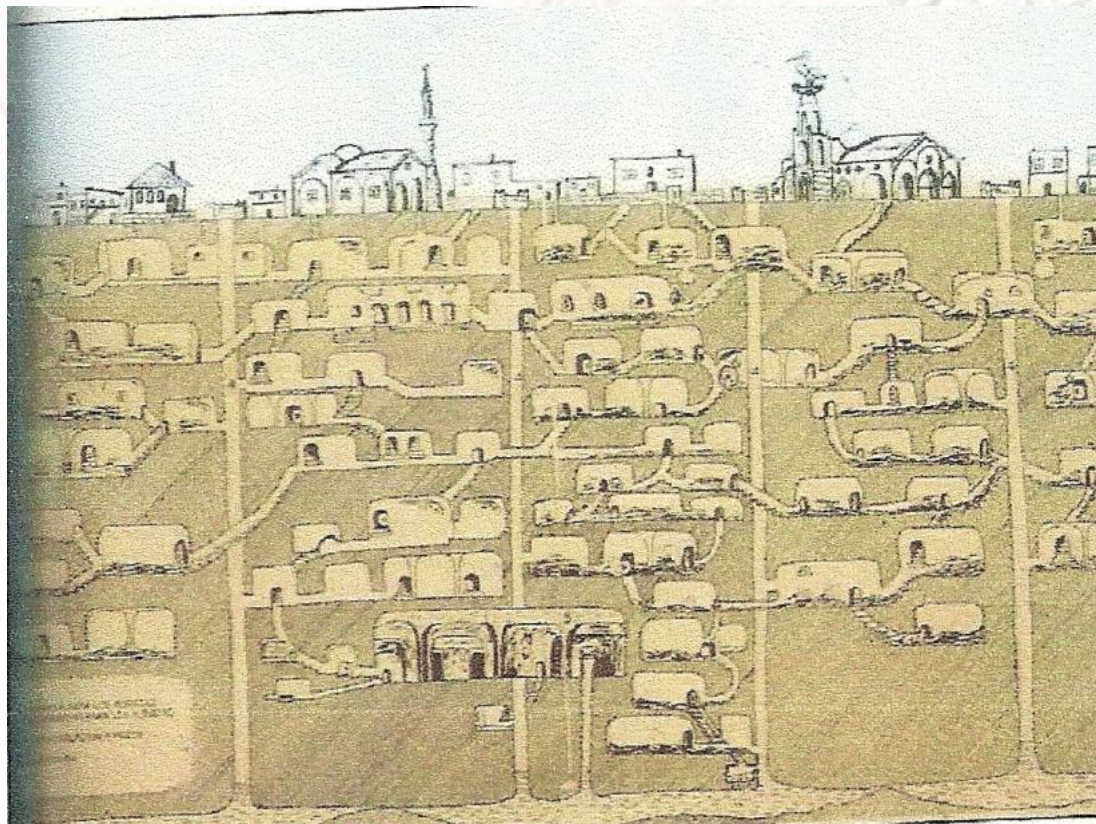
Secção da tumba de Seti I. Vale dos Reis (Ubierna J.A.J., 1990)



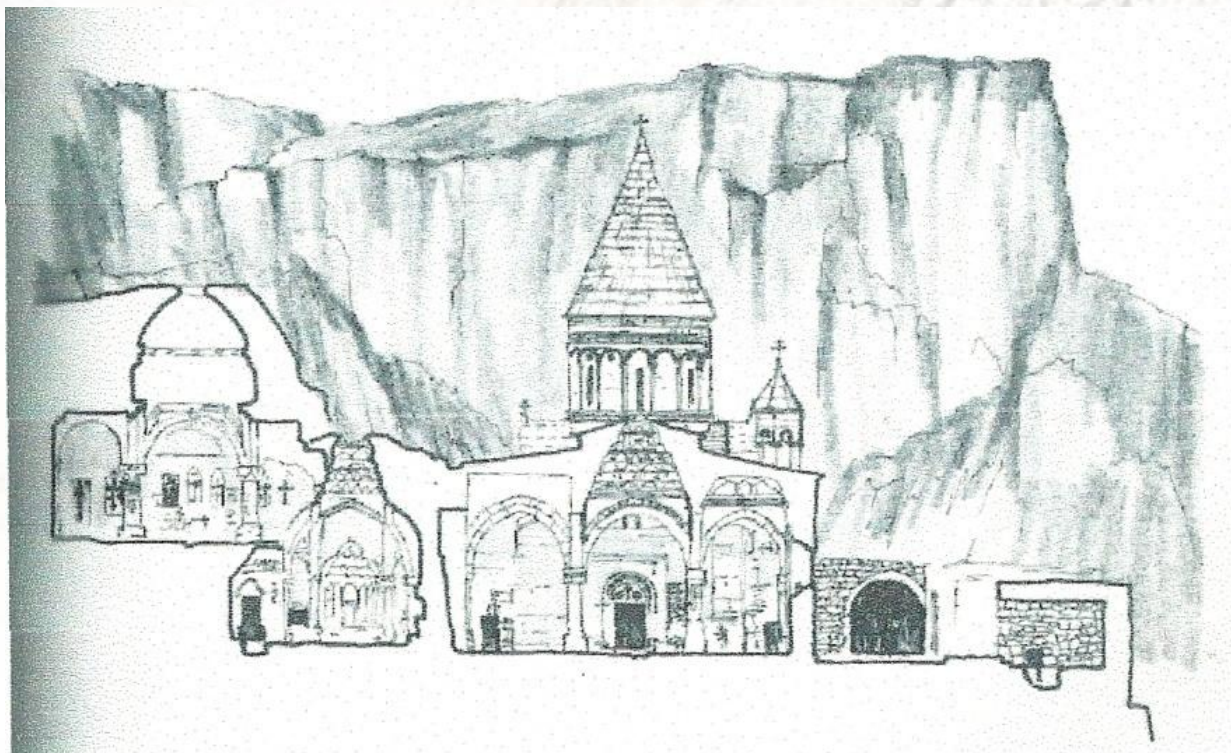
Arquitetura troglodita no Valle de Zelve. Capadocia (Ubierna J.A.J., 1990)



Perspectiva da cidade subterrânea de Derinkuyu. Capadocia (Ubierna J.A.J., 1990)



Secção da cidade subterrânea de Derinkuyu. Capadocia (Ubierna J.A.J., 1990)



Monastério de Geghard. Armênia (Ubierna J.A.J., 1990)

Séc. XVII

- Pólvora
- Newton/Hooke

Séc. XVIII

- Canal Bridgewater – James Brinkley(1761)



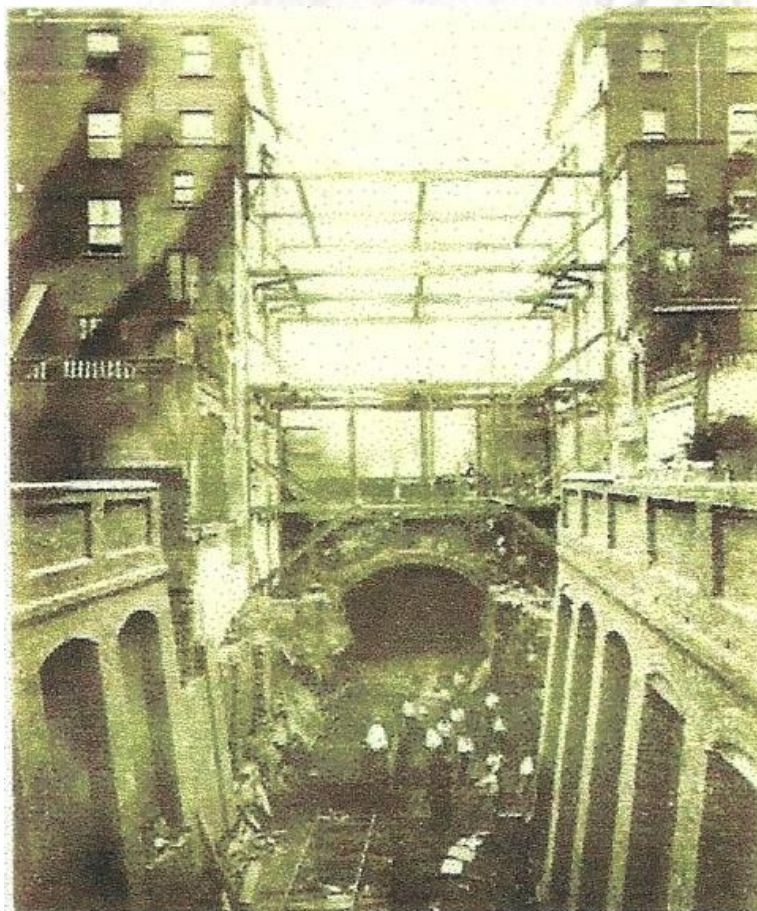
Séc. XIX

- 1ª tentativa de túnel sob o Rio Tâmisa (1807)
- 1ª couraça – Brunel (1822 – 1826 → 1842)
- 1º túnel ferroviário Roanne – Andressieux (1826)
- 1ª Utilização de equipamento hidráulico de perfuração (1857)
- Descoberta da dinamite – Nobel – “drill and blast”
- Couraça cilíndrica – Greathead (1869)
- Caixões pré-moldados – Roterdã, Antuérpia, Hamburgo



Característica de Túneis

- Colaboração do maciço
- Forma curva
- Túneis em rocha
 - Intuição
 - Regras empíricas
 - Tentativa e erro
- Túneis em solo
 - Couraça (séc. XIX – séc. XX)
 - Cut and cover



Metrô de Londres (1860)



O PROJETO DE TÚNEIS A PARTIR DO SÉCULO XX

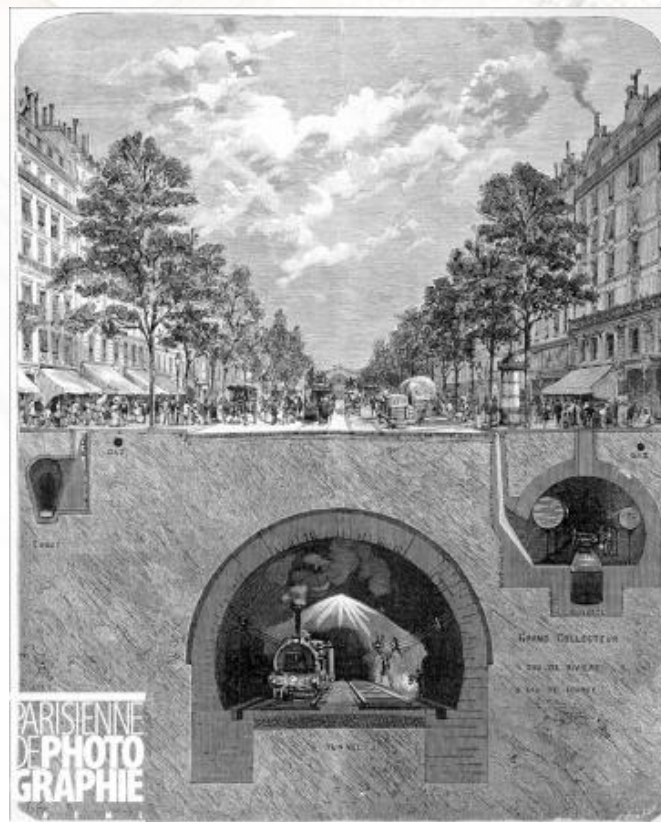
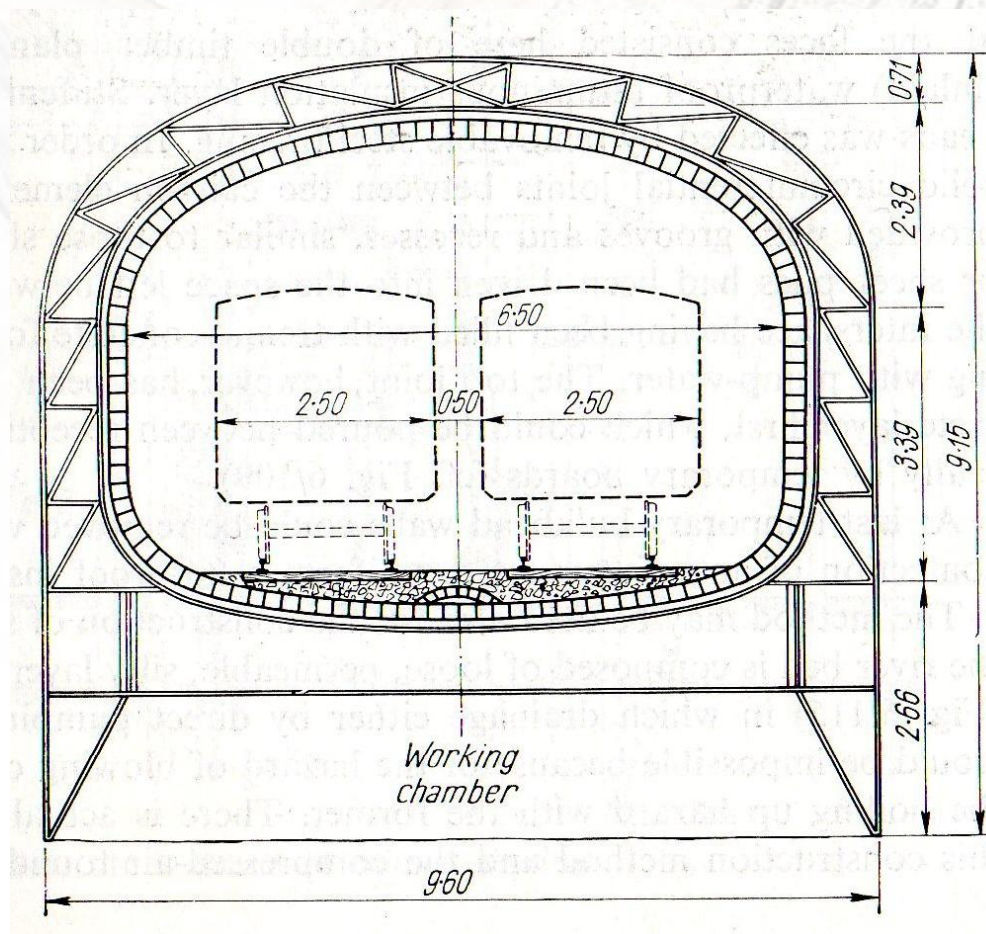


Foto do metrô de Paris de 1900



Foto do metrô de Paris de 1900





1ª Tentativa de considerar interação solo-estrutura embora sem compatibilizar os deslocamentos

1922 – Hewett and Johannesson

(revestimento de anéis de couraça)

- Importância da flexibilidade

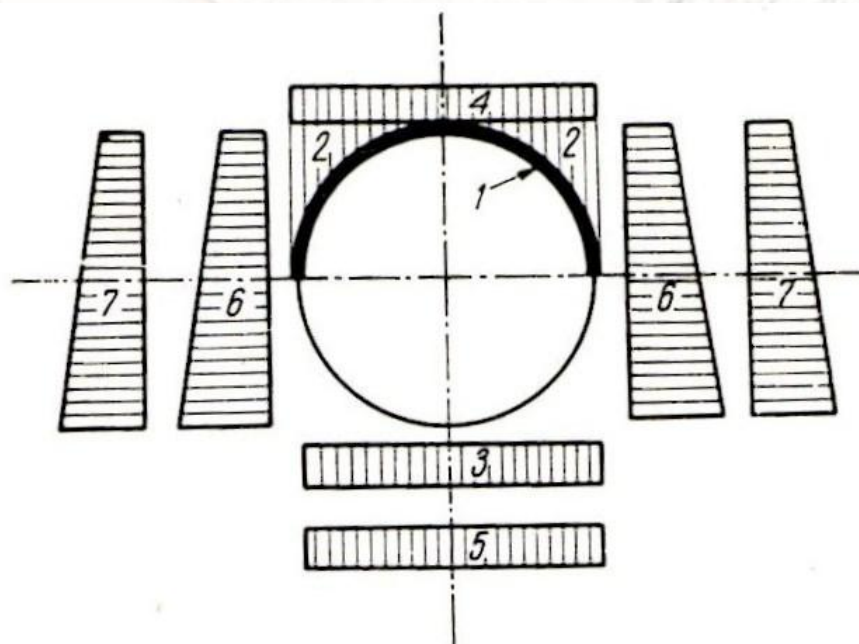
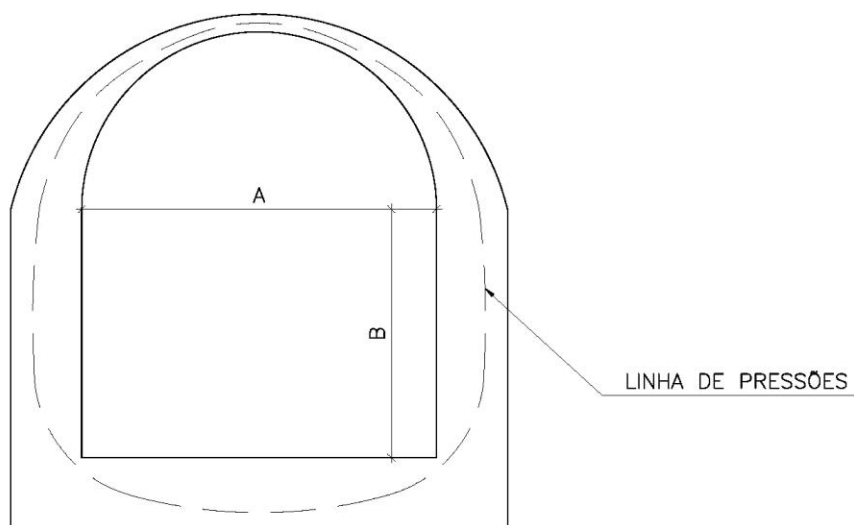


FIG. 4/57. The final load acting on the ring (HEWETT-JOHANNESSON)

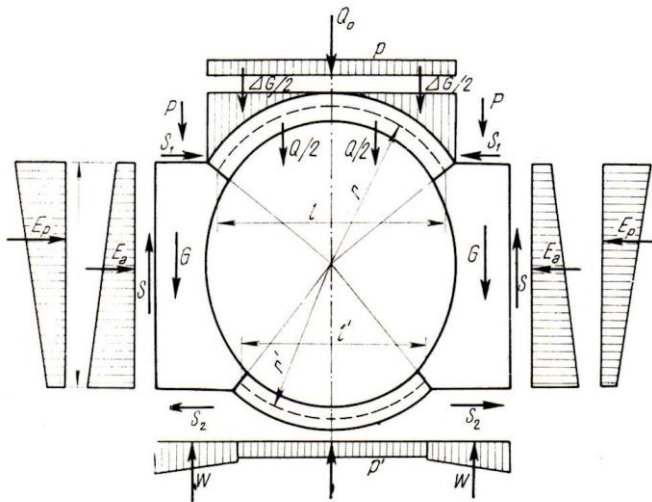


- Não interessa a distribuição de tensões, a geometria do revestimento deformado corresponde à “linha de pressões” do carregamento final.
- Minimização da energia de deformação

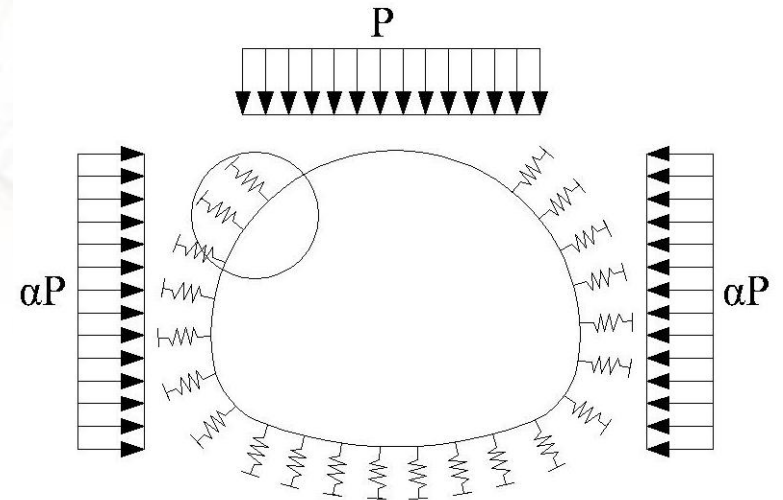




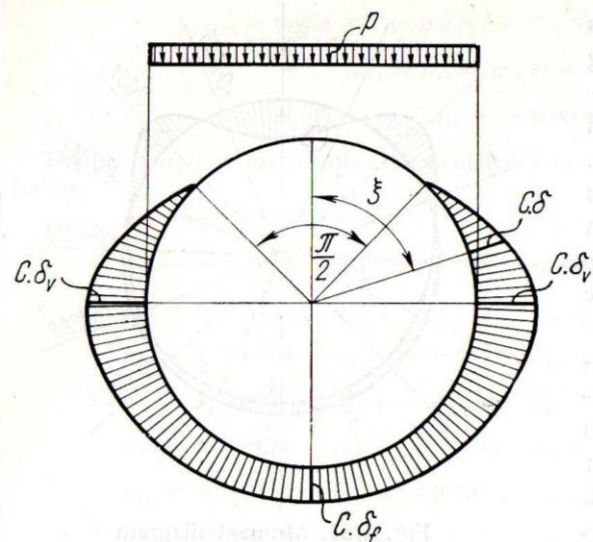
- O desenvolvimento dos métodos construtivos e materiais potencializam o surgimento dos modelos e métodos de cálculo, com aplicação da Teoria da Elasticidade e da Teoria da Plasticidade. Fenner (1938), Mindlin (1939), Kérisel, Terzaghi-Richart (1952).
- Mecânicas: Solos, Sólidos e Rochas
- Restrições em relação a coberturas e proximidade dos túneis
- Face às hipóteses simplificadoras restritivas que permitiam a resolução das equações da Teoria da Elasticidade e da Teoria da Plasticidade, os revestimentos eram calculados com as hipóteses da Resistência dos Materiais.



Sem considerar a interação
(solo como reação imposta)



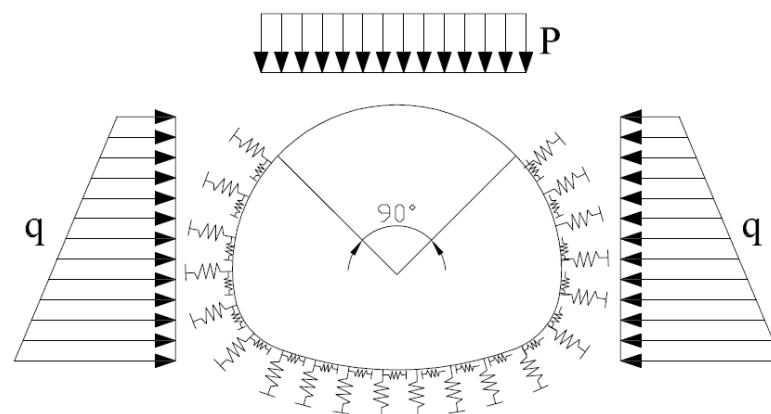
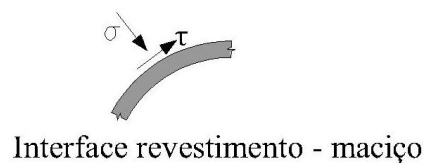
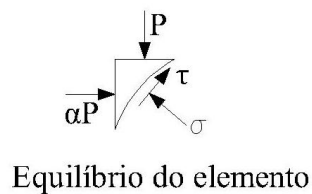
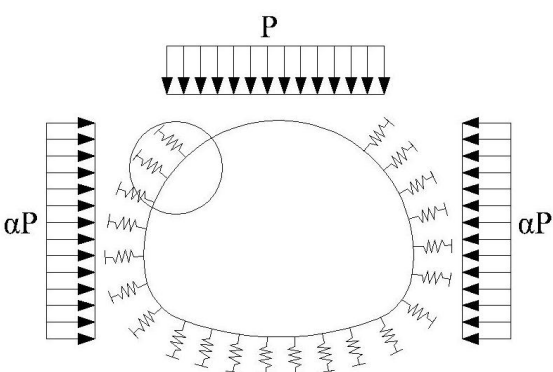
Considerando a interação
(solo como meio discreto)



Dado o carregamento, p a reação do solo, contínua e normal à superfície é definida por $C\delta_v$ e $C\delta_f$, sendo C o coeficiente de relação elástica do solo, de modo que para

- $\xi < 45^\circ$ não há reação
- $45^\circ < \xi < 90^\circ$ $C\delta = C\delta_v \cos 2\xi$
- $90^\circ < \xi < 180^\circ$ $C\delta = C\delta_v \sin^2 \xi + C\delta_f \cos^2 \xi$

Trata-se de uma estrutura com grau de hiperestaticidade igual a 2, cujas equações de compatibilidade correspondem à imposição de que os deslocamentos finais devidos ao carregamento e às reações do solo sejam δ_v na geratriz horizontal e δ_f no fundo. Trata-se, portanto, de aplicar as leis de interpolação acima para dois deslocamentos nodais.



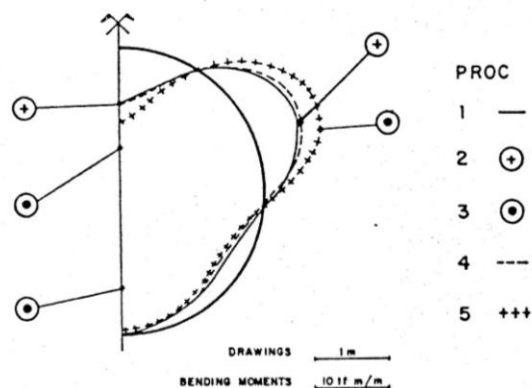


fig. 7

Procedure 1 - Type B-2: soil discretized by finite elements elastic - plastic behaviour; yield criteria is non-tension Mohr-Coulomb.

Procedure 2 - Bull Method, Type B-1: soil discretized by Winkler springs, top region free; consider only normal loads, tangential ones are neglected as well as tangential reaction, i.e, friction between soil and lining; symmetrical loading; there is no load imposed at the bottom.

Procedure 3 - Windels Method - Type B-1: in addition to previous one consider second order theory and loads on the bottom same as on the top.

Procedure 4 - Type B-1: Matrix Analysis with radial and tangential springs linear elastic behaviour; radial springs are non-tension and disactivated on top region; tangential springs not disactivated at top and limited by Mohr-Coulomb yield criteria; values of subgrade reaction coefficients used are: $K_n = 1,2 E_{soil}/R$ and $K_t = 0,5 K_n$.

Procedure 5 - Type B-1: Matrix Analysis with radial springs only, considering normal and tangential loading components.

6. Results analysis

- Procedures 1, 2 and 4 gave best results. Procedures 1 and 4 are best ones because are less restrictives. Similitude of results obtained for Procedure 2 are not guaranteed every case.
- Procedure 2 is better than procedure 3 because bottom loads are not imposed.
- Results of procedure 5 are not good because it was considered friction for actions and not for reactions. One can use procedure 5 neglecting tangential loads, as well as is done in procedure 2.

Comparação entre MEF, Método de Bull, método de Windel, análise matricial com molas radiais e tangenciais e análise matricial apenas com molas radiais (Maffei-1987)



Rabcewicz (Water Power 1964)

NATM x AWT

NATM – concreto projetado e “rock bolts”

- Não permite deformação livre do maciço
- Flexibilidade e resistência a curto prazo
- Potencializa a resistência do maciço

Premissa – Não há instabilização sem aviso, de modo que controlando os deslocamentos é possível reforçar com concreto projetado e tirantes (M.D.C.)



AWT – perfis metálicos

- Permite a livre deformação do maciço e sua degradação parcial.
- Não há como reforçar, de modo que deve ser dimensionado para resistir qualquer carregamento que possa ocorrer.



2. CONCEITOS ATUAIS

2.1. multidisciplinaridade OST

2.2. métodos construtivos nos túneis em solos

2.3. obras provisórias e permanentes

suporte

revestimento

2.4. funções dos elementos de condicionamento

rebaixamento do lençol – escavação a seco

- limitar gradientes

- reduzir pressões neutras que condicionem superfícies de ruptura

enfilagens

- limitar deslocamento

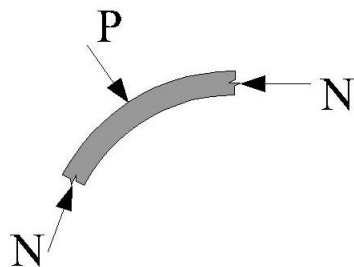
- pré-revestimento

pregagem

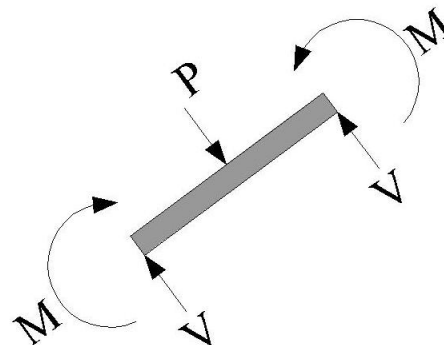
- evitar queda de blocos

- intrusão rígida para reforço do maciço

2.5. Concreto Projetado – Geometria e Flexibilidade



Equilíbrio de elemento curvo
sem solicitações transversais



Equilíbrio de elemento reto
com solicitações transversais

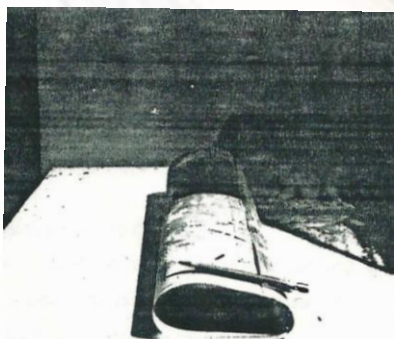


Foto 4 – Folha de poliéster que simula o revestimento.

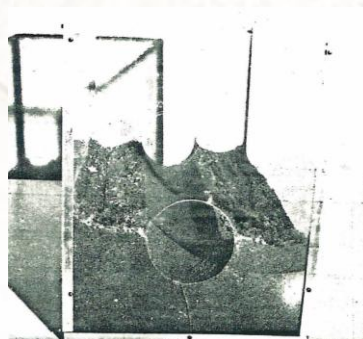


Foto 5 – Berço pronto para receber o tubo.

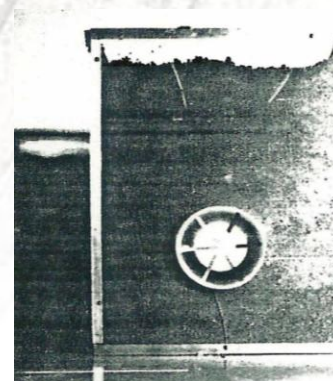


Foto 6 – Vista do escoramento interno.

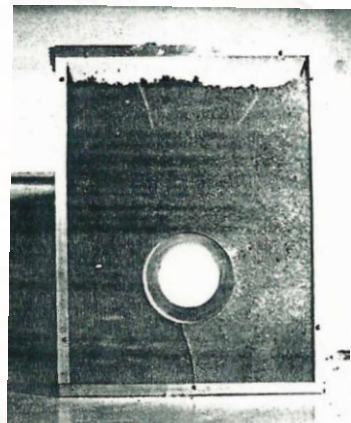


Foto 7 – Estágio de construção após a remoção do escoramento interno.

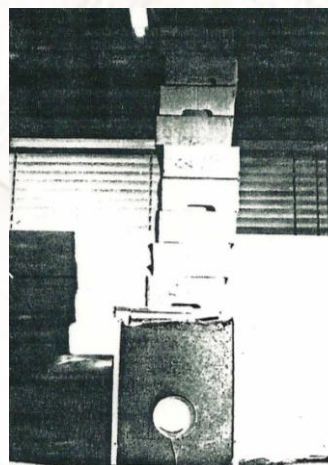


Foto 8 – Aplicação de sobrecargas.

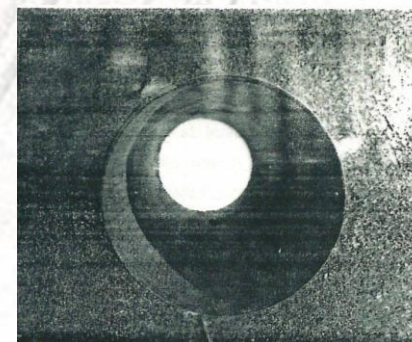


Foto 9 – Vista do revestimento de poliéster.



Foto 10 – Vista do revestimento sem deformações significativas.

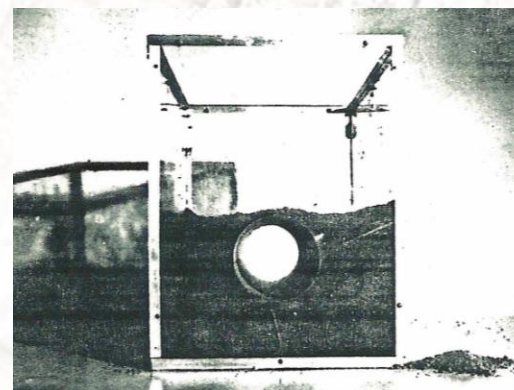


Foto 11 – Testes com remoção do escoramento interno quando o reaterro alcança o topo da galeria.

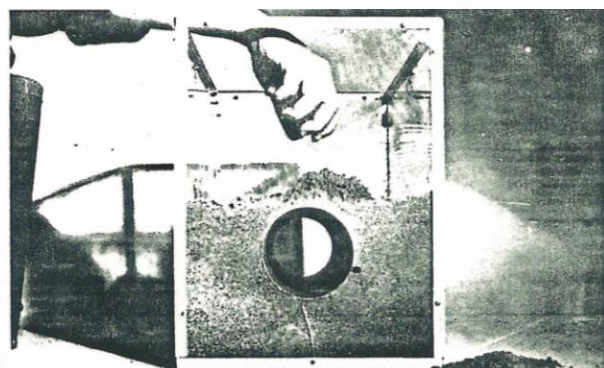


Foto 12 – Aplicação Manual do Reaterro.

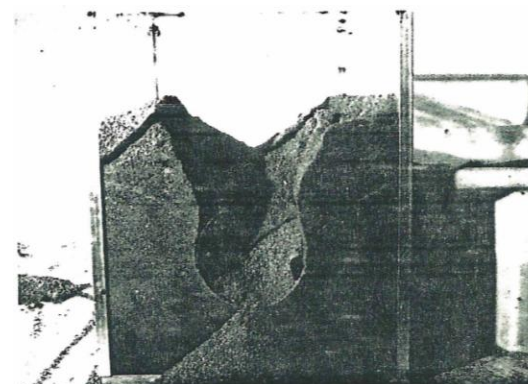
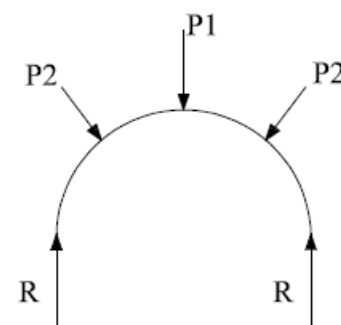
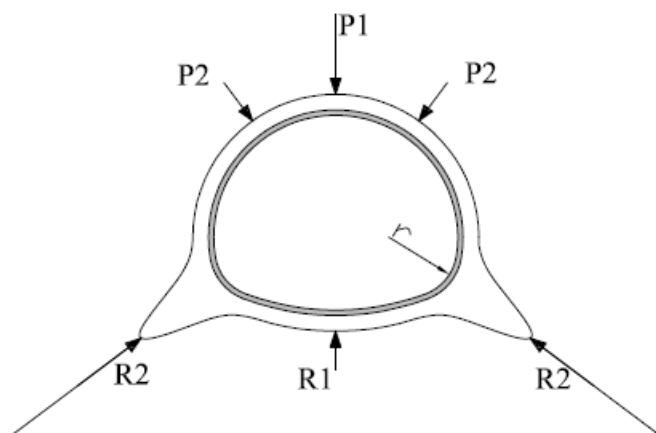


Foto 13 – Colapso com Reaterro a 10cm Acima do Topo do Tubo.



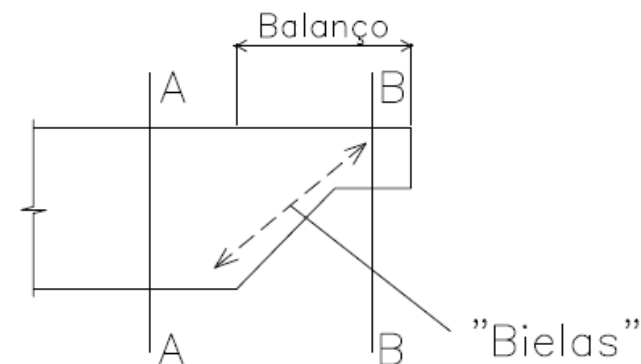
Esquema do equilíbrio entre ações e reações em revestimentos com simetria



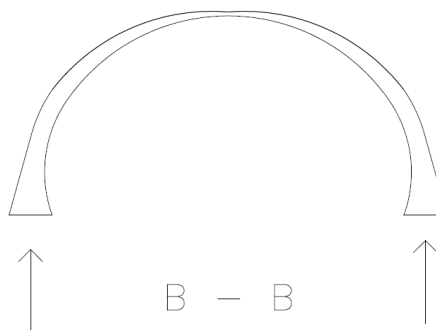
A — A



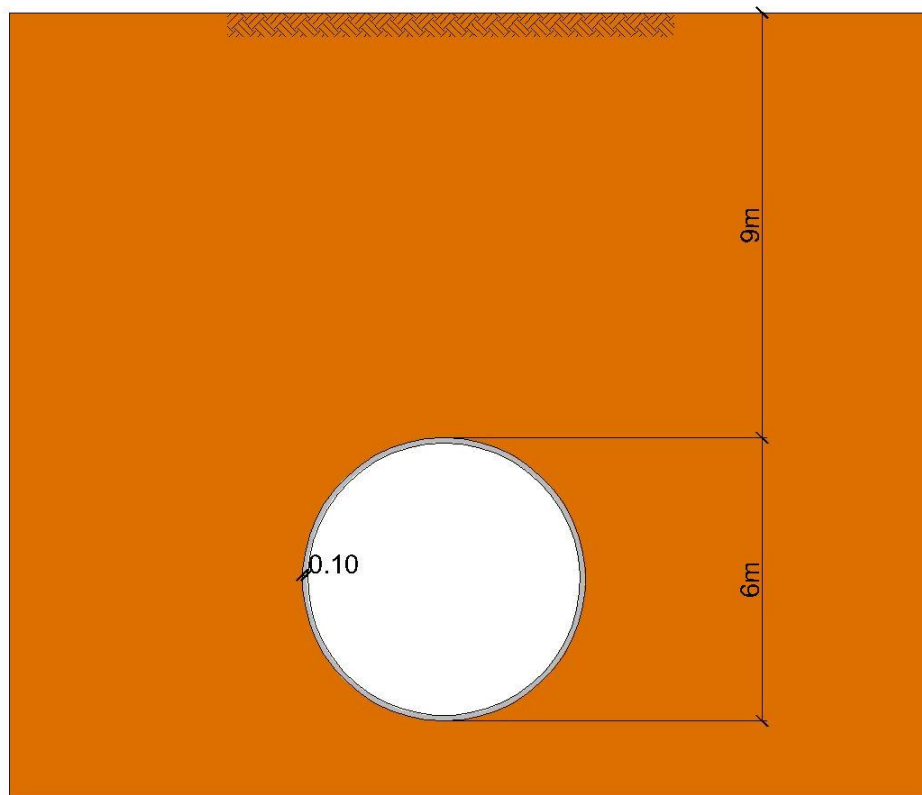
B — B



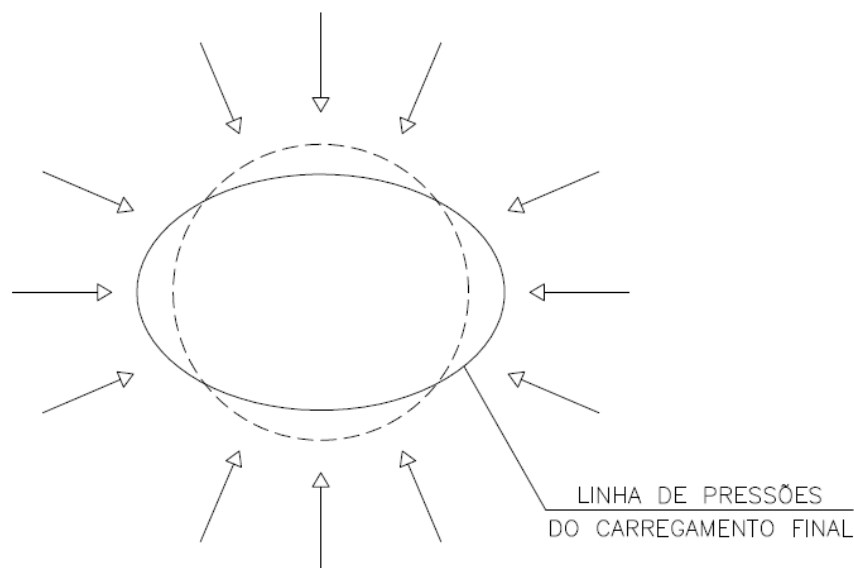
Equilíbrio esquemático junto à frente

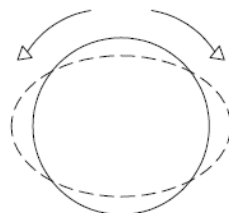


- Flexibilidade X Arqueamento

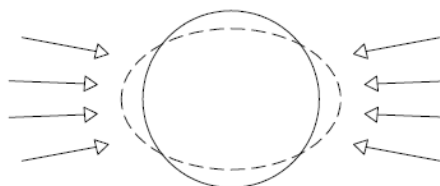


sem consideração de arqueamento



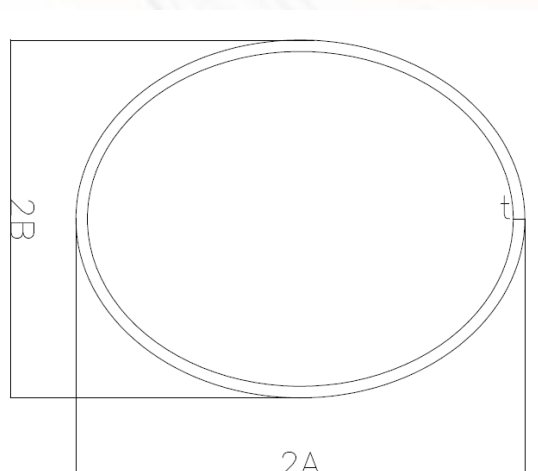


(A)



(B)

Redistribuição do carregamento em revestimentos flexíveis

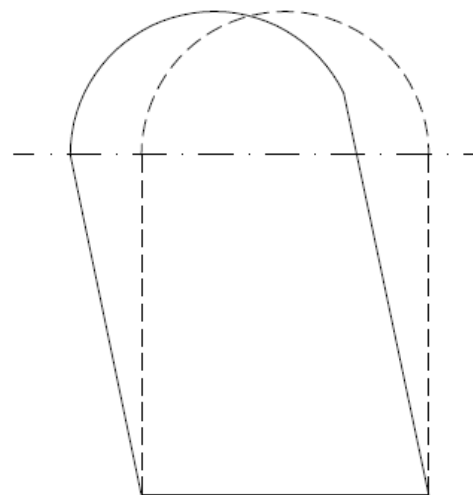
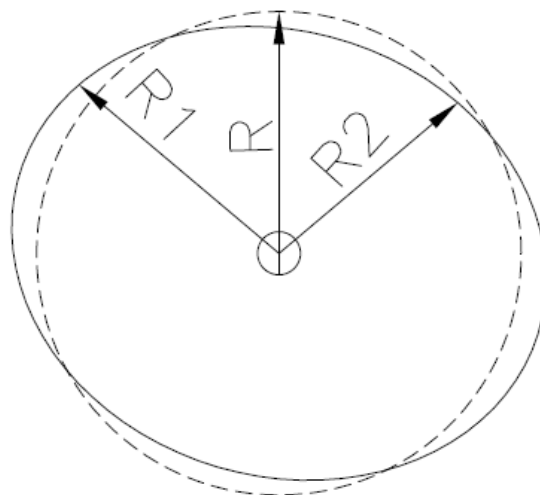


$$\frac{E(AB)^{3/2}}{E_1 t^3} > 20$$

E_s módulo de Young do maciço

E_1 módulo de Young do revestimento

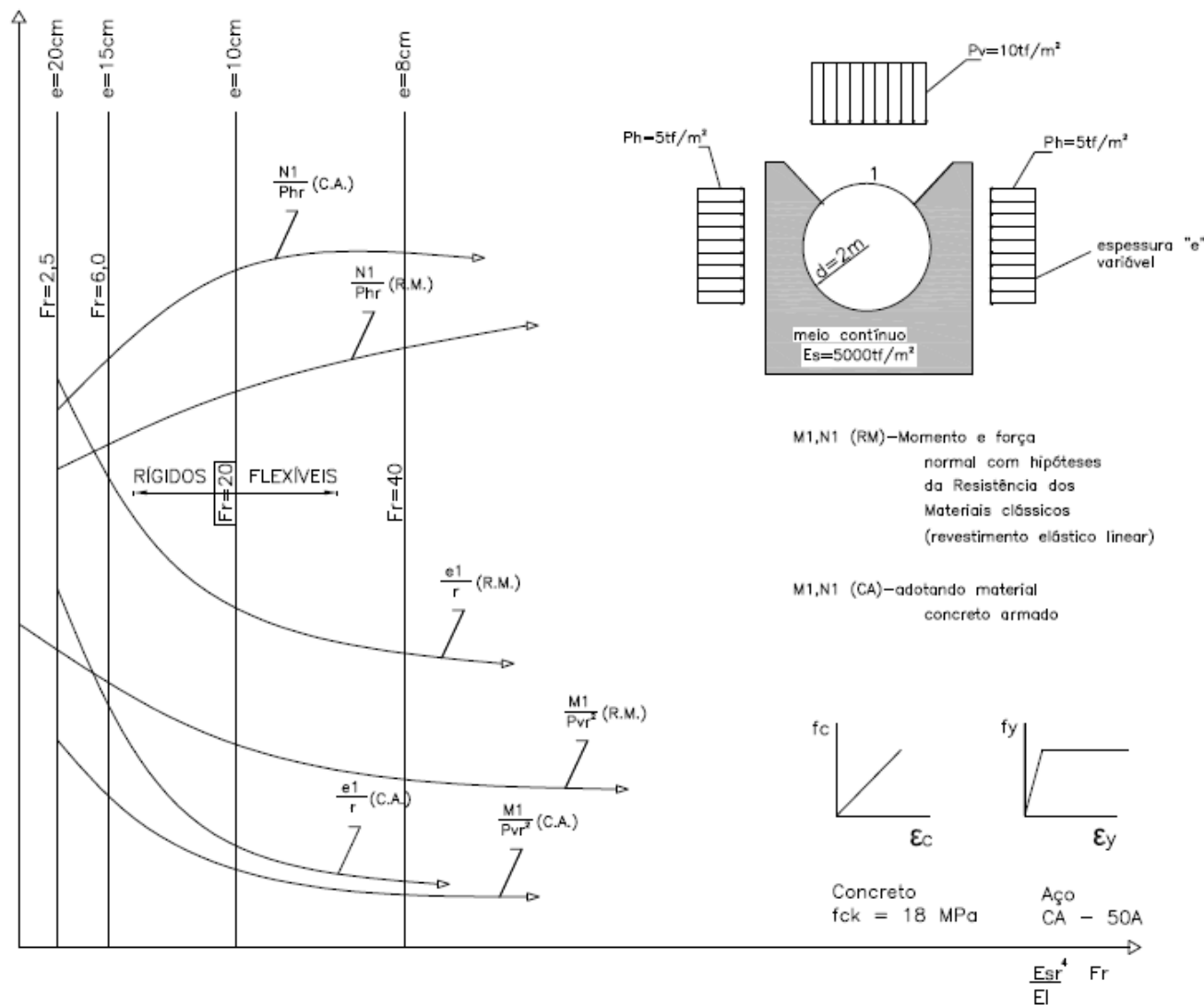
Condição de revestimento flexível (Ranken)



Efeito da distorção em formatos de revestimentos



2.6.Consideração da Não-Linearidade Geométrica e Física



2.7. Função dos elementos complementares de Suporte

- Cambotas

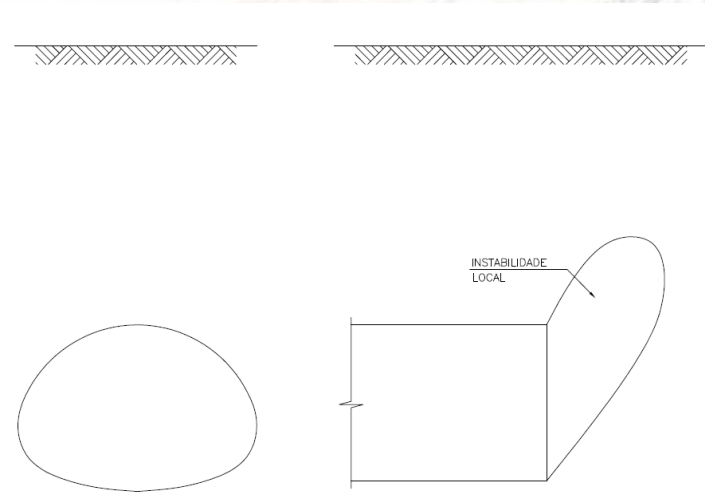


Túnel Estrada da Rainha (2005) - Salvador

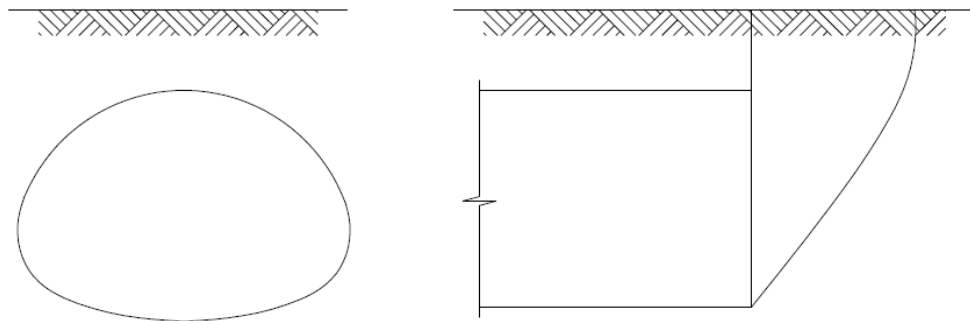


- Telas
- fibras

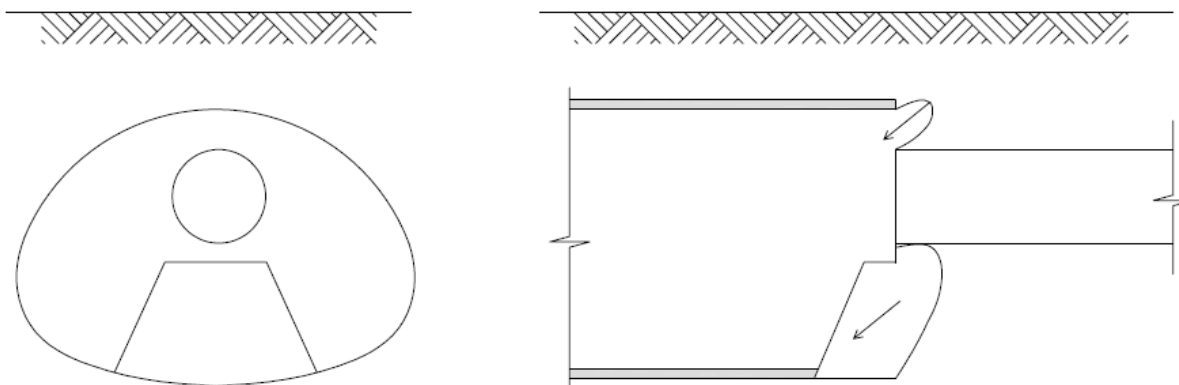
2.8. Baixa Cobertura e Proximidade



Túnel de grande cobertura – instabilidade local é limitada



Túnel de baixa cobertura – instabilidade local passa a ser global



Túnel de baixa cobertura com túnel piloto – instabilidade passa a ser local



Passagem do Cabula – cobertura 1,40m- Salvador



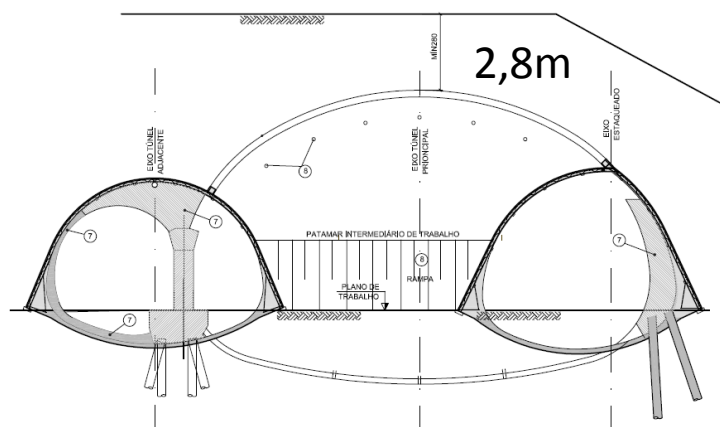
Travessia sob a linha férrea - Pindamonhangaba



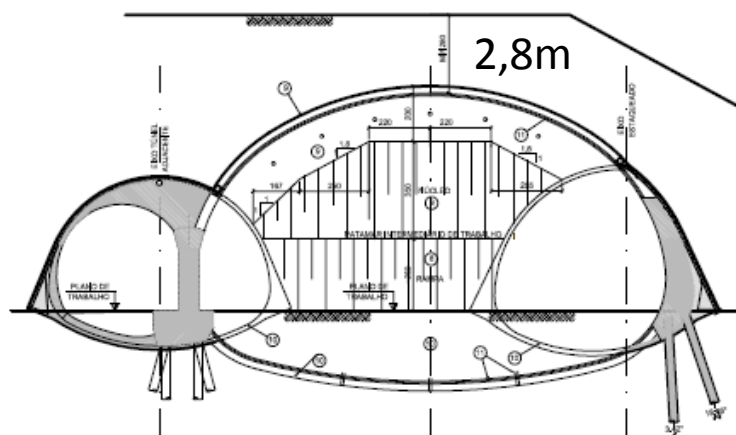
Travessia sob a Rodovia Dutra – Caçapava



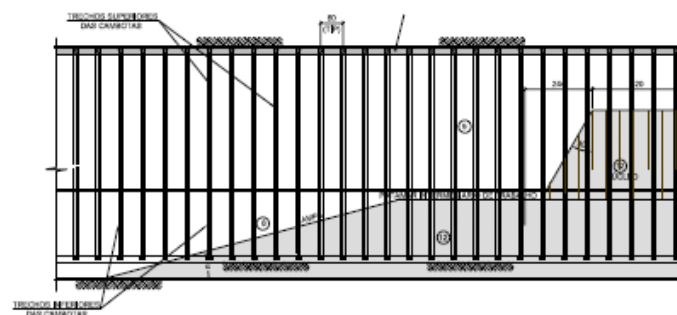
Travessia sob a Rodovia Dutra - Caçapava



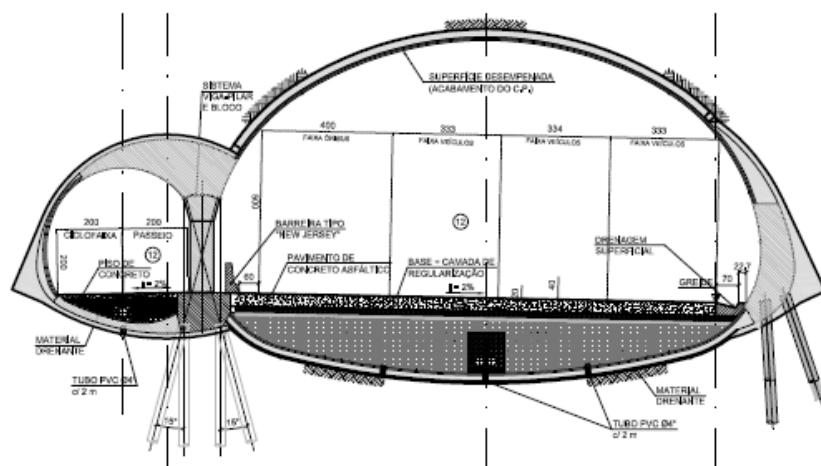
FASE 1 - EXECUÇÃO DOS CONCRETOS MOLDADOS-SUPOORTE DO TÚNEL PRINCIPAL



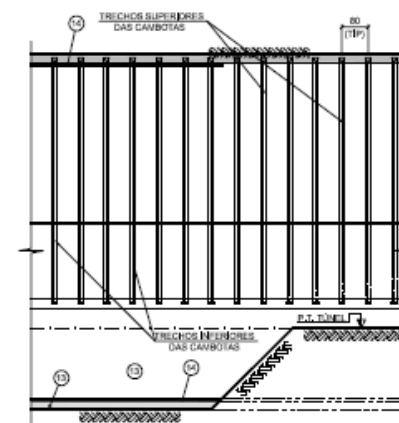
FASE 2 - EXECUÇÃO DO TÚNEL PRINCIPAL



ESCAVAÇÃO DA CALOTA - CORTE LONGITUDINAL



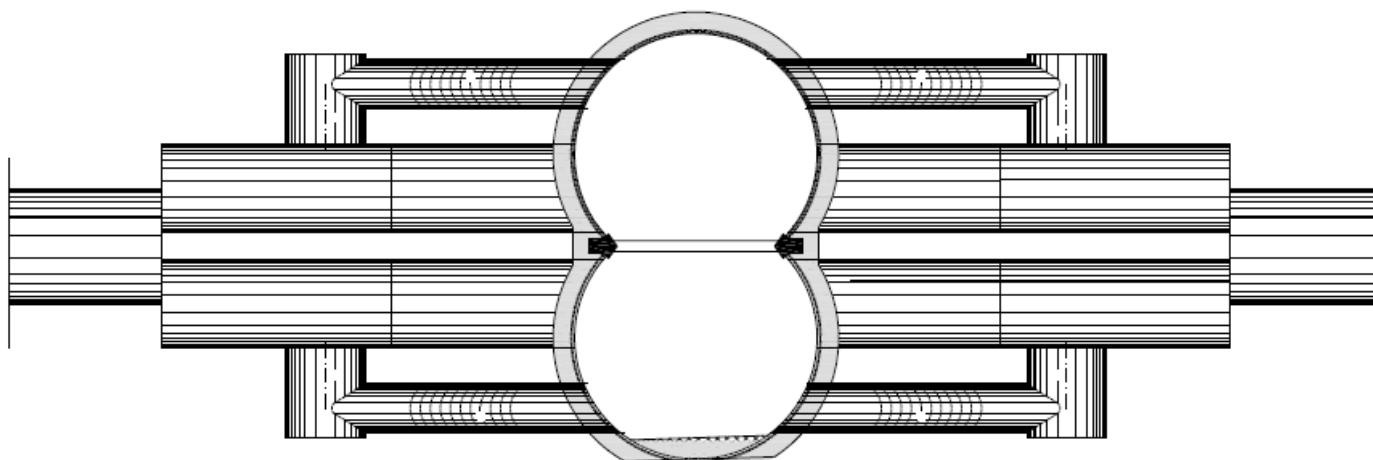
FASE 3 - EXECUÇÃO DO SISTEMA DE DRENAGEM, PAVIMENTO E ESTRUTURAS INTERNAS

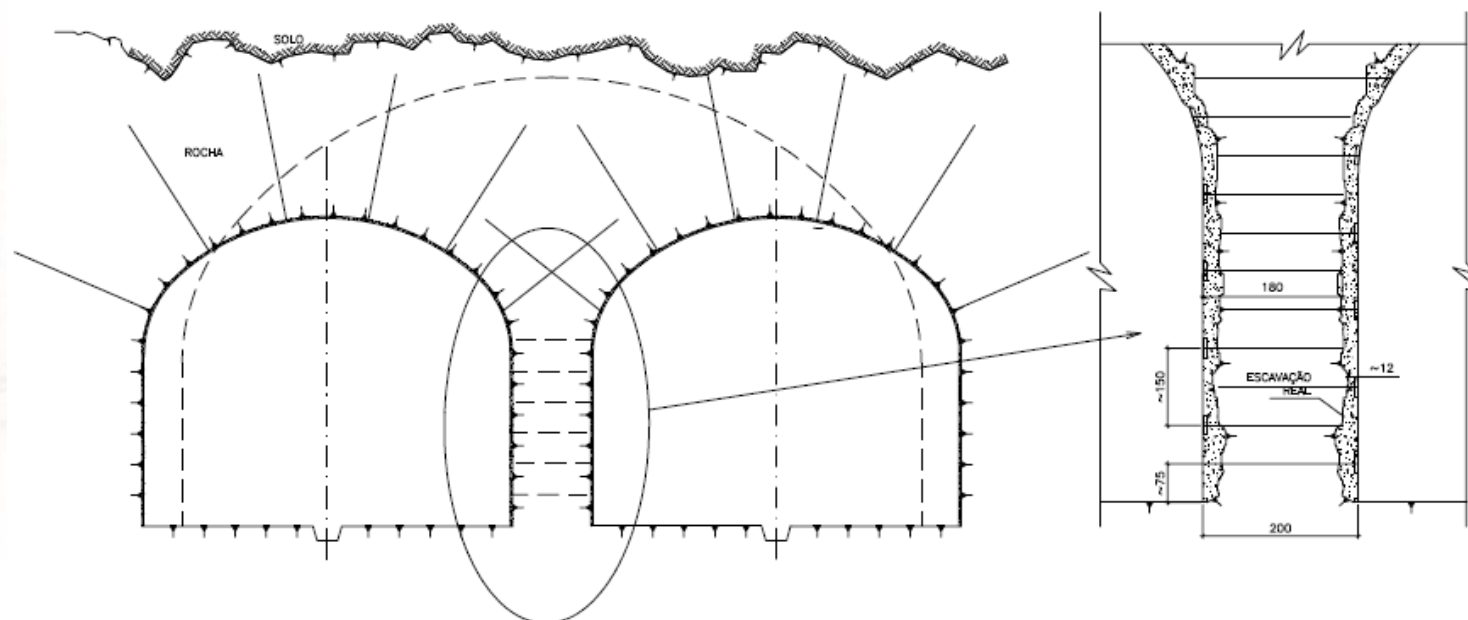


ESCAVAÇÃO DO REBAIXO DO TÚNEL - CORTE LONGITUDINAL

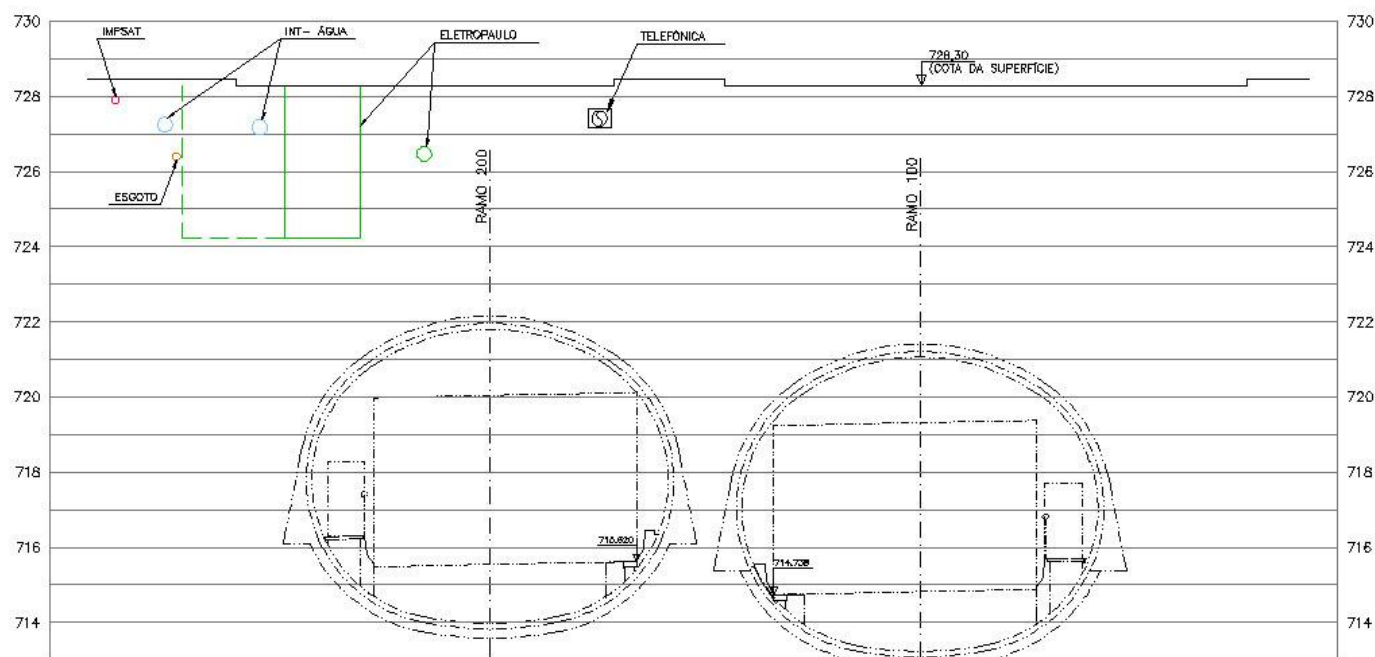








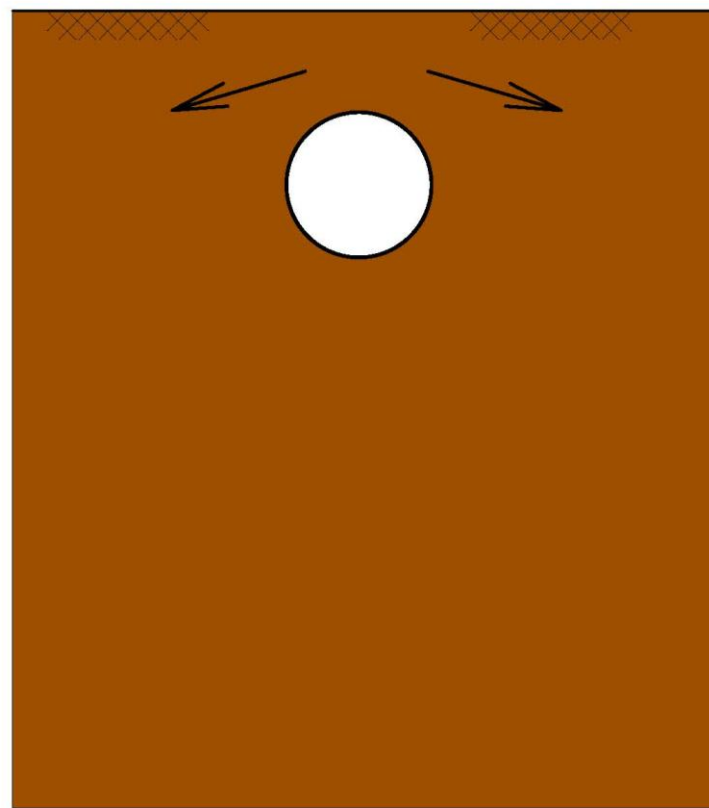
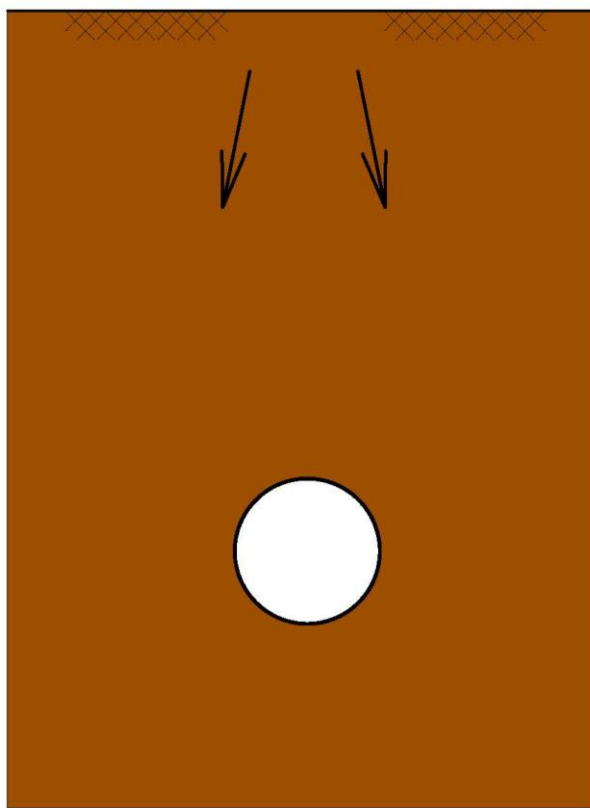
Planta e corte da Estação Pólvora do Metrô de Salvador (2002)



CORTE TRANSVERSAL — ESTACA 1013+3.60 / 2013+3.727
ESCALA 1:100

Túnel sob a Av. Faria Lima, SP

2.9. Arqueamento





2.10. Nível de Alerta

Nível de alerta para cada tipo de mecanismo

$$\text{SRF} \quad \frac{\text{tg}34^0}{1,5} = \text{tg}24^0$$

Estabilidade não significa segurança

3. A Representatividade dos modelos de cálculo

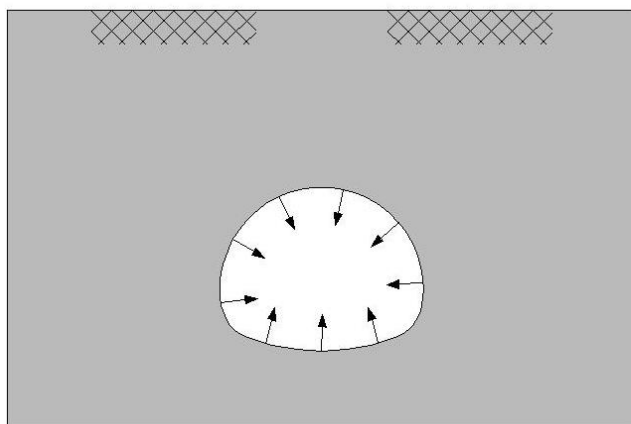
Modelo conceitual
Modelos derivados
(Modelos hierárquicos)

Obras	Acima da superfície	Enterradas
Ações	Nominais	?
Estrutura	Construída	?
Reologia	Construída	?
M.C./Solicit.	Trivial	?
Normas	Consolidadas	?

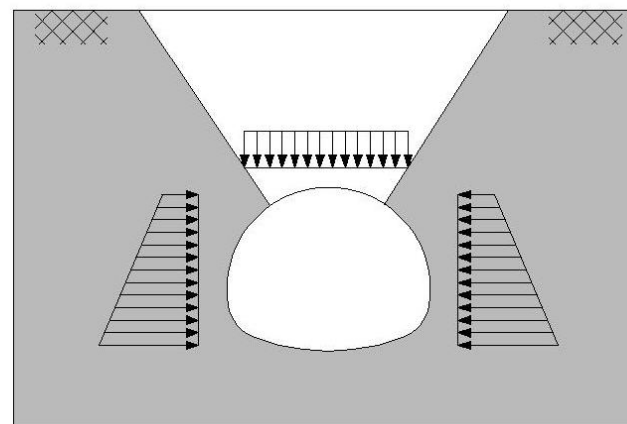
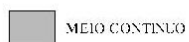


Leroy Emkin-GTStrudl

“se pudesse venderia o programa apenas para quem fosse capaz de resolver um problema mais simples sem utilizar computadores”



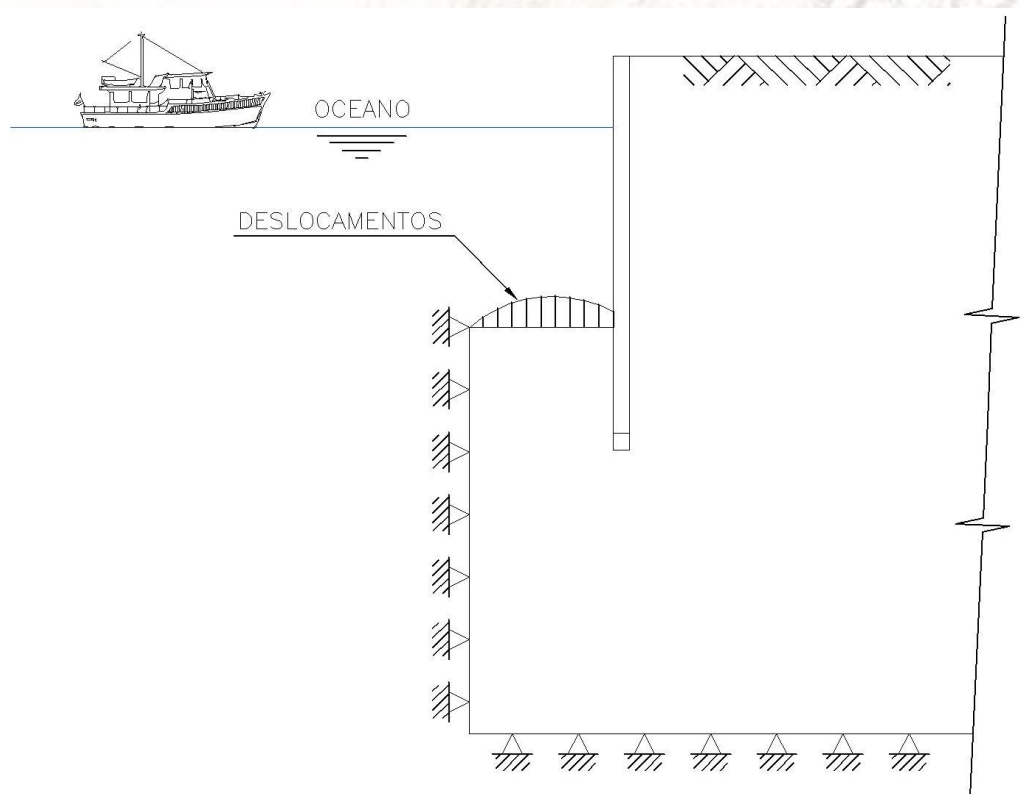
MAE - Modelo de Ações Espontâneas



MAI - Modelo de Ações Impostas



Foto de túnel empurrado

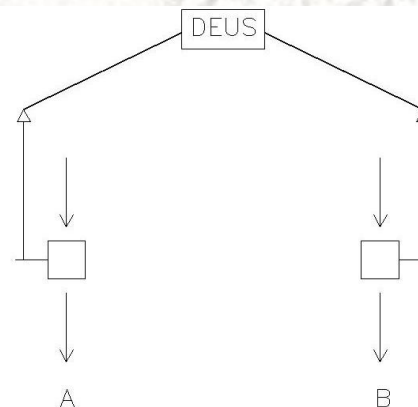
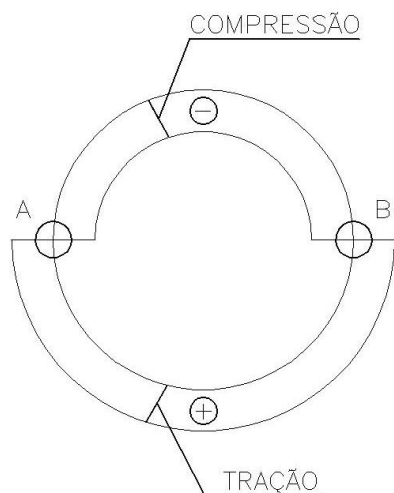


Condições de contorno adotadas – escala aproximada

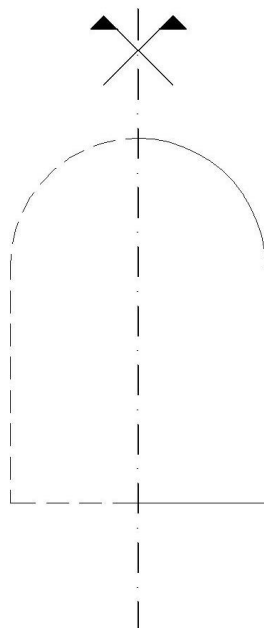


“Any design that relies for success on precise calculations will be a bad design.” – Golder.

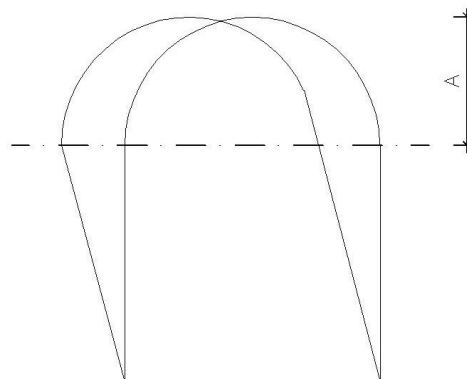
“Quelques ressemblances entre les calculs et la réalité seront mère coïncidence.” – Kèrisel.



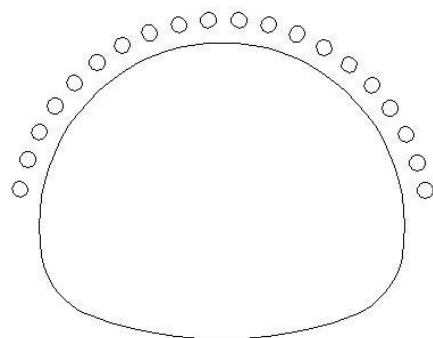
Forças Normais no revestimento – Equilíbrio dos nós ?



Modelo adotado com simetria

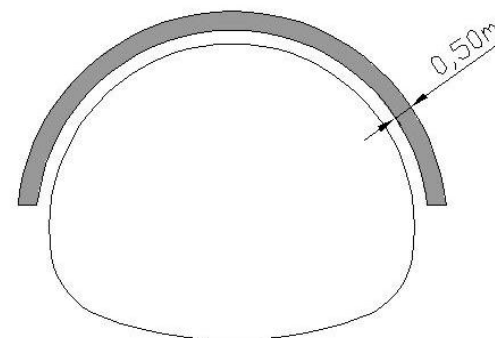


Modelo com distorção

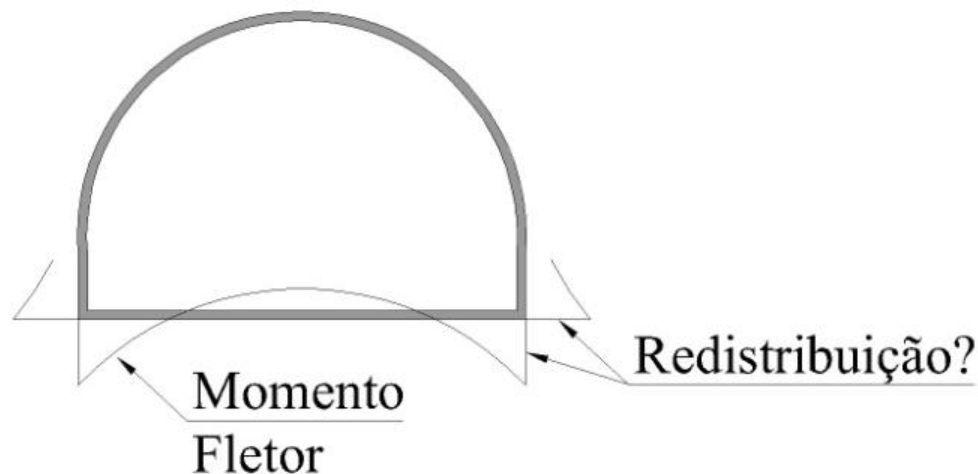


Tratamento com enfilagens

X

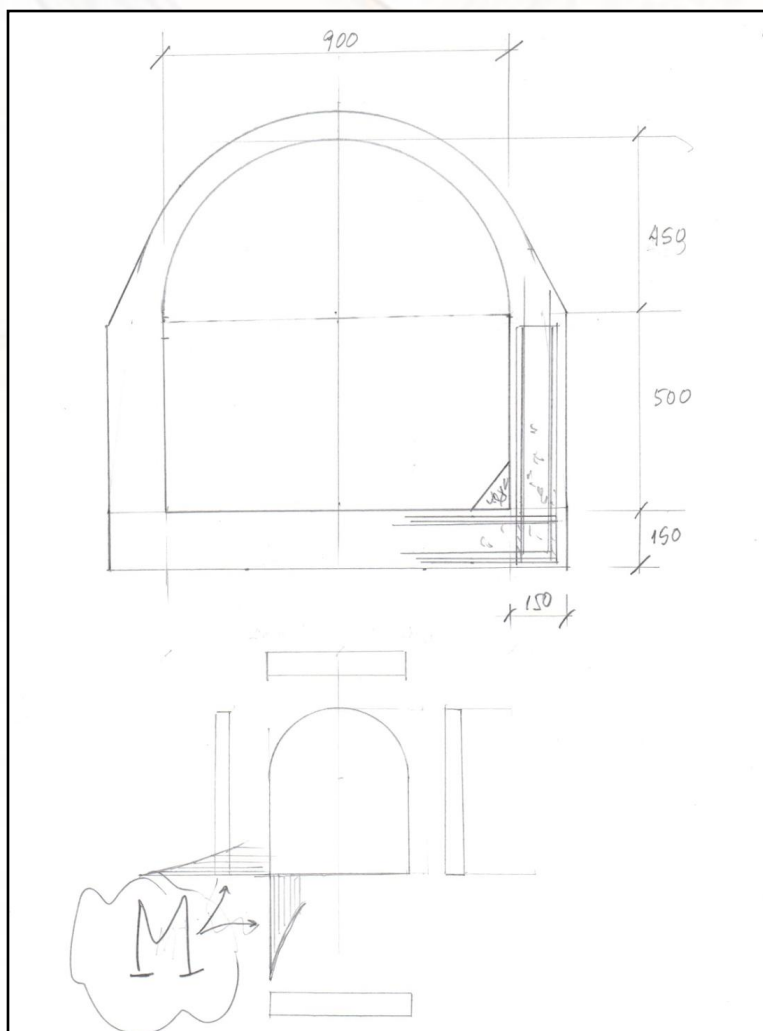


Enfilagens modeladas como camada de solo, de resistência à compressão 2MPa e $\phi=35^\circ$



De acordo com a memória de cálculo os momentos fletores não são resistidos pelo revestimento, mas são redistribuídos!

TÚNEL SOB O JARAGUÁ





AGRADECIMENTOS

Escola Politécnica

Maffei Engenharia

Dr. Paulo Franco Rocha (in memoriam)

Prof. Dr. Décio Leal de Zagottis (in memoriam)

Prof. Dr.^a Evelynna Bloem Souto Silveira

Em especial ao CBT



ESCRITÓRIO TÉCNICO FRANCO ROCHA

“OS DEZ MANDAMENTOS”

- respeitar as equações de equilíbrio
- não combata esforços sem necessidade
- não conceba uma estrutura que não saiba calcular



OBRIGADO PELA ATENÇÃO