UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Influencia del acondicionamiento del material excavado en la operación y control de las tuneladoras EPB

Xavier Borghi
Kaelin Toscano Ltd
Zurich, Suiza

KÄLIN TOSCANO

Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

Objetivos

1. Dar una visión general de los resultados obtenidos en las investigaciones sobre el acondicionamiento del suelo en tuneladoras *EPB*.

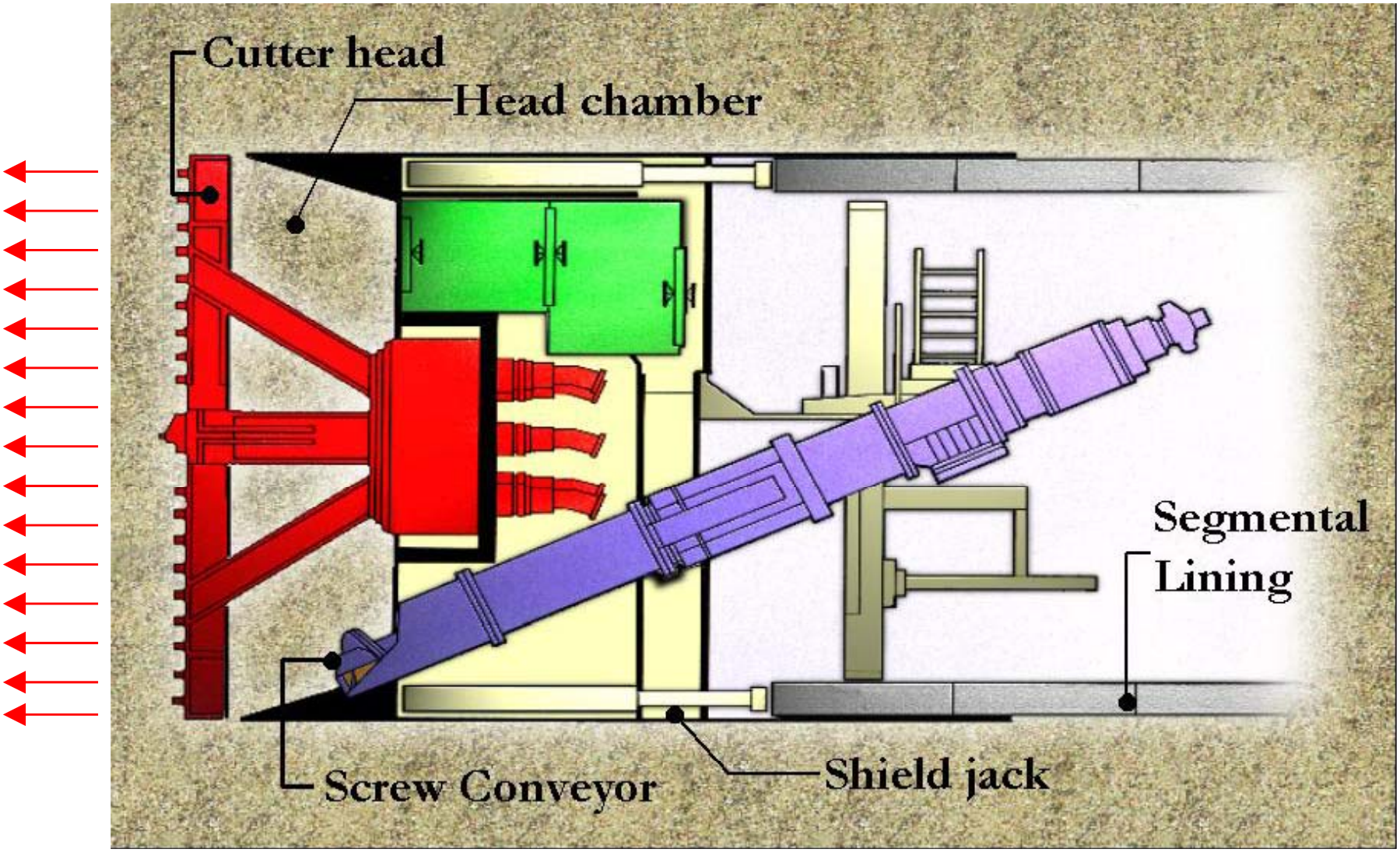
2. Resumir lecciones claves aprendidas del monitoreo durante la construcción del *CTRL* – en particular la interacción entre el acondicionamiento del suelo, el control de la presión del frente y la pérdida de volumen generada por la operación de las *EPB*.

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

Indice

1. Principios de operación de las tuneladoras *EPB*
2. Acondicionamiento del suelo
3. Investigación en Cambridge (2001-2005)
   - 3.1 Objetivo y metodologia
   - 3.2 Ensayos de laboratorio
   - 3.3 Monitoreo del Channel Tunnel Rail Link (*CTRL*)
4. Conclusiones

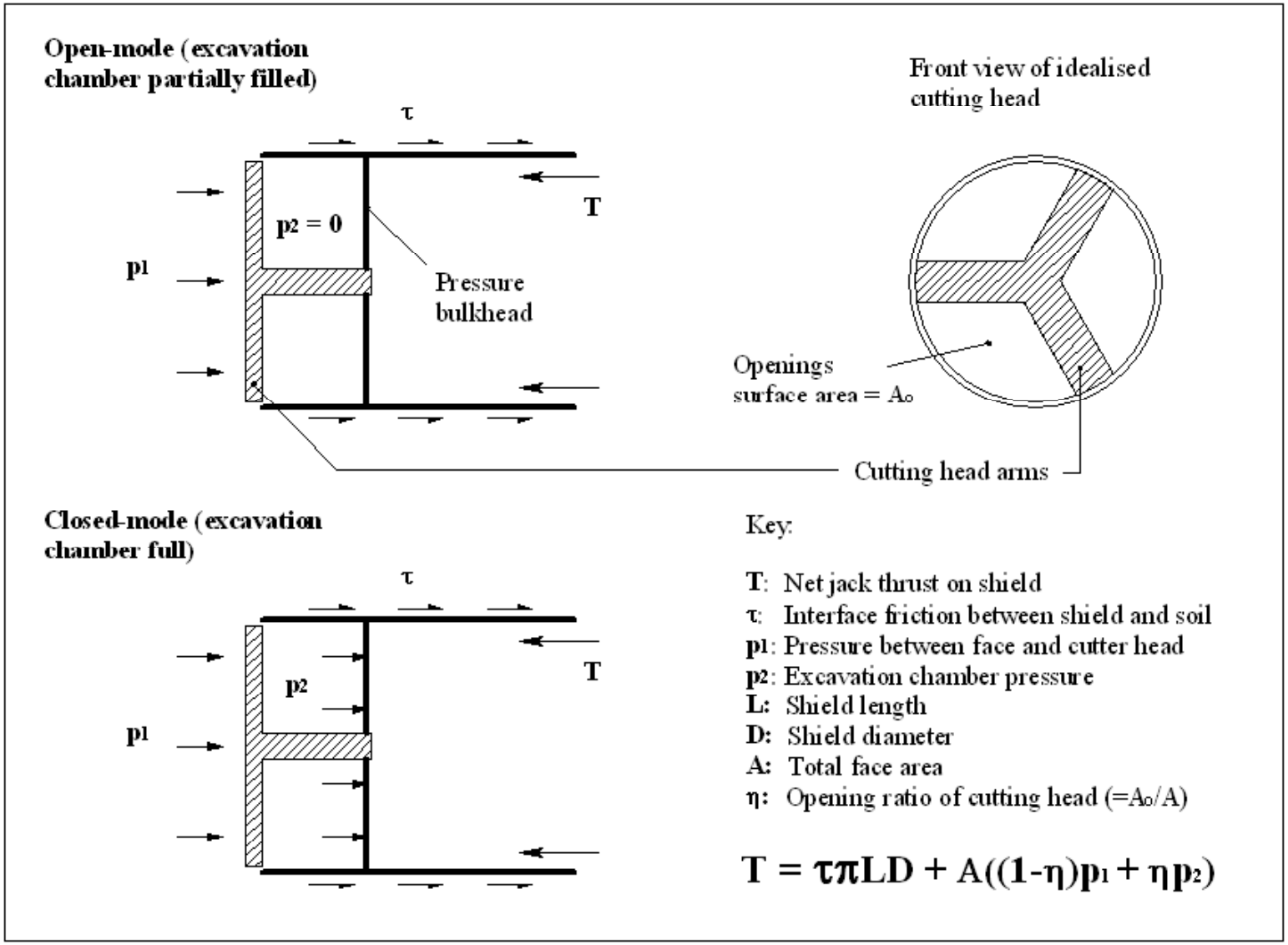
1. Principios de operación: suporte al frente



Cortesía de Herrenknecht Ltd

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

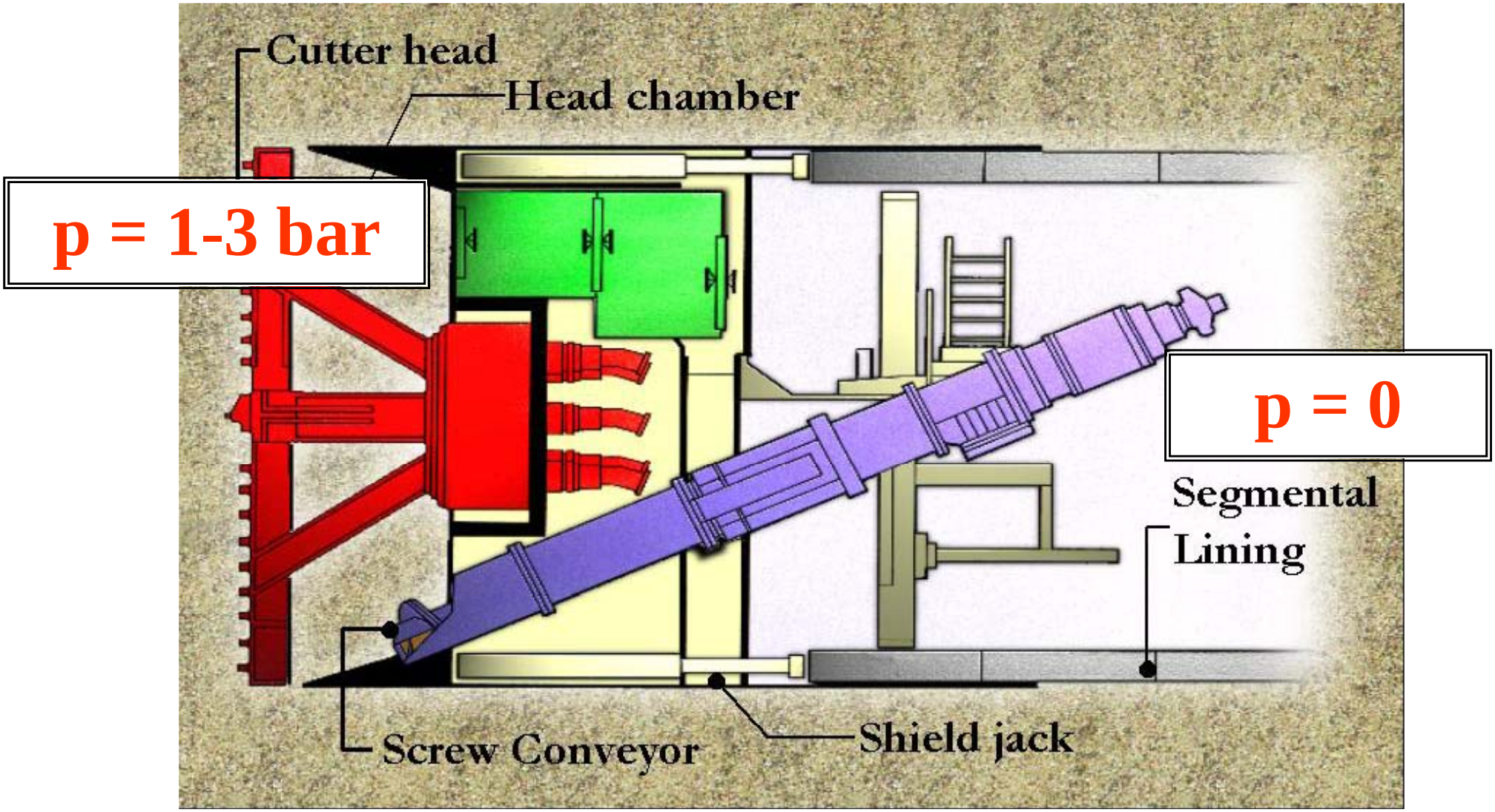
1. Principios de operación: presión de suporte al frente



Borghi, 2006

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

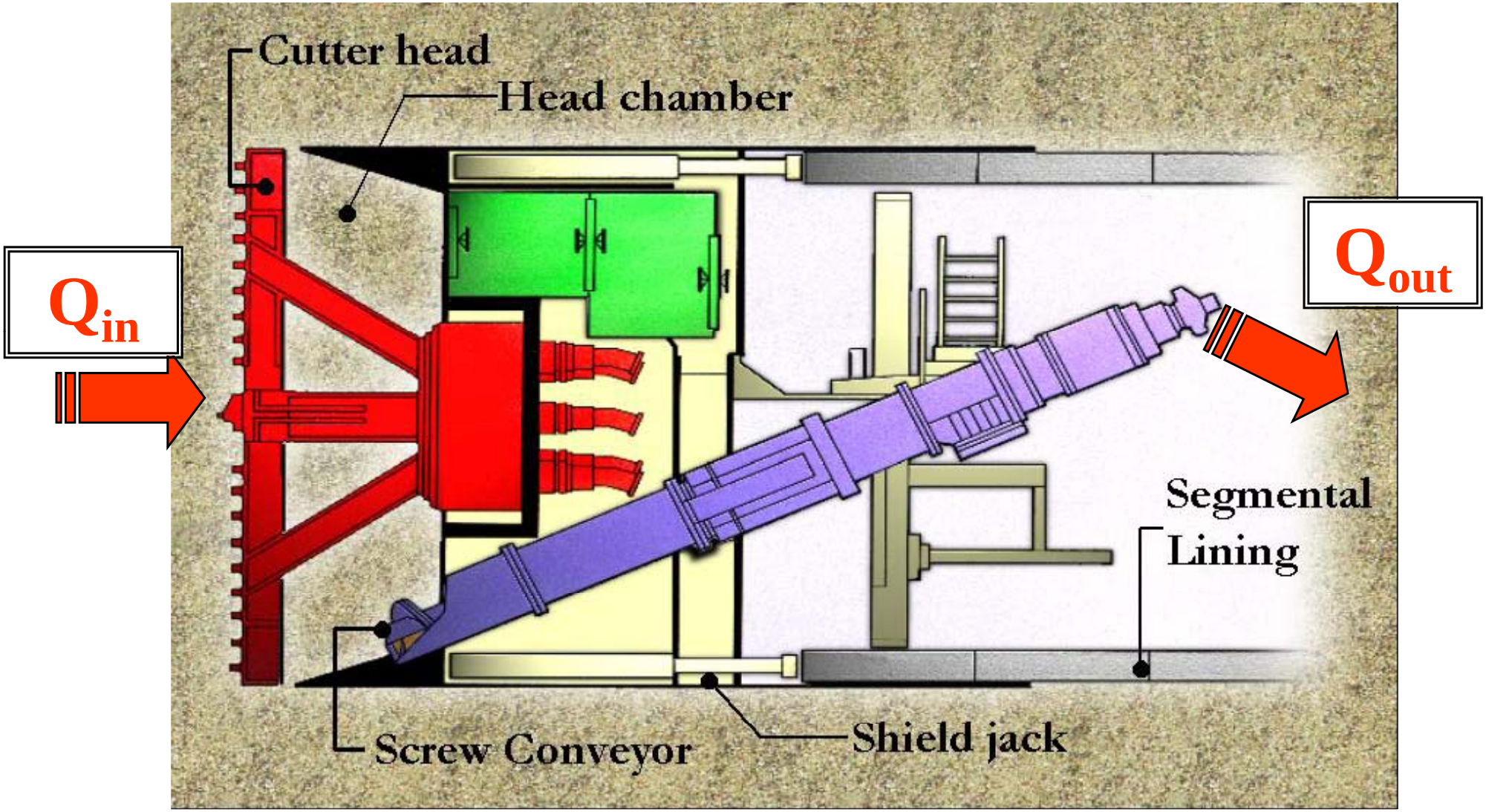
1. Principios de operación: funcción del tornillo sinfín



Cortesía de Herrenknecht Ltd

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

1. Principios de operación: control de la presión de cámera



Cortesía de Herrenknecht Ltd

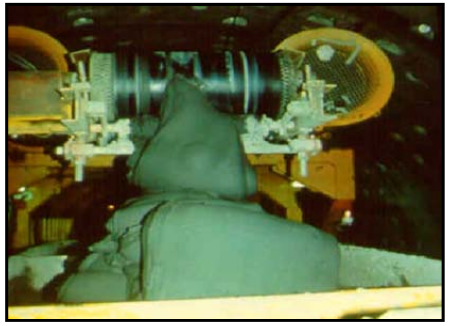
KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

2. Acondicionamiento del suelo

Maynar *et al.*, 2000

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

2. Acondicionamiento del suelo: objetivos



- Alterar las propriedades del material en la cámara del frente para obtener una resistencia al corte no drenado de 20-30 kPa
- Bajar la permeabilidad del material para impedir o controlar el ingreso de agua a través de la cámera y del tornillo sinfín
- Mezclar el suelo excavado para formar una masa homogénea que favorezca la operación estacionaria de la tuneladora
- Reducir la adherencia entre arcillas de alta plasticida y las componentes de la tuneladora

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

2. Efectos principales de los aditivos

- Espuma (Agentes tensioactivos + agua + aire comprimido)
  - Reduce la fricción entre las partículas de suelos arenosos
  - Aumenta la compresibilidad del material excavado
  - Reduce la permeabilidad de material arenoso
- Polímeros (PHPA, PAC, ...)
  - Reducen potencial de adsorción de agua en cortes de arcilla
  - Impide compactacion de arcilla en una masa de alta resistencia
  - Cambia la plasticidad de arcillas (limite de Atterberg)
  - Influencia marcada en las propriedades de la espuma

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

2. Acondicionamiento del suelo: dificultades (...en el 2001)

- State-of-the-art
  - Guías para seleccionar método acondicionamiento eran (y son aún) insuficientes, sobre todo para el uso de polímeros
  - Investigación sistemática era aún limitada
  - Solo existían pocos estudios bien detallados
- Consecuencias
  - Selección de aditivos adecuados en diferentes tipos de suelos.
  - Cantidades requeridas difíciles de determinar (FIR, PIR)
  - Procedimiento estándar de ensayos para cuantificar las propriedades relevantes del material acondicionado
  - Posibilidad de excavar arcillas rigidas con tuneladoras EPB en modo de frente cerrado?

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

3.1 Vista general del programa de investigación

Objetivo general: ¿Comó acondicionar cada tipo de suelo para permitir operaciones ideales de las tuneladoras EPB?

Metodología de la investigación		Resultados
Ensayos de laboratorio	Caracterización del material acondicionado	Propriedades de suelos acondi-cionadas con espuma y polímeros
	Modelo físico de un tornillo sinfín	Mecanismo de disipación de presión en un modelo de tornillo sinfín
Monitoreo de campo	Análisis de la operación de tuneladoras EPB	Efectos del acondiciamiento sobre el control de las tuneladoras
	Mediciones de asenta-mientos superficiales	Efectos de los parámetros operativos de las tuneladoras en los asentamientos

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur Management Engineering

3.2 Ensayos de laboratorio

Ensayos de laboratorio

Caracterización del material acondicionado

Modelo físico de un tornillo sinfín

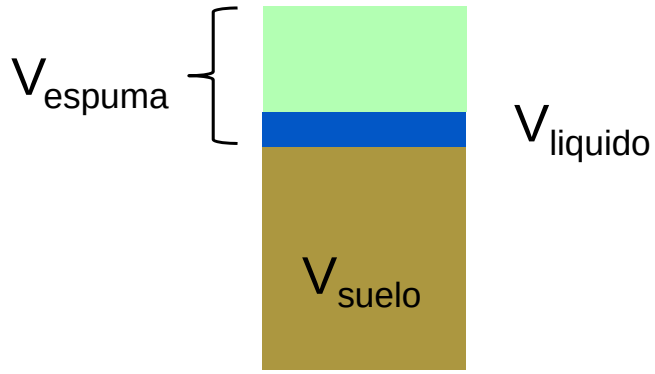
3.1 Caracterización del material acondicionado

Metodologia

- Definir tipo y dosis de aditivos para el *CTRL*
- Estimar la resistencia al corte no drenado
- Shear vane – Fall cone test
- Muestras de arcilla de Londres y de arcilla del Lambeth Group
- Acondicionamiento con espuma y polímeros

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

3.1 Caracterización del material acondicionado



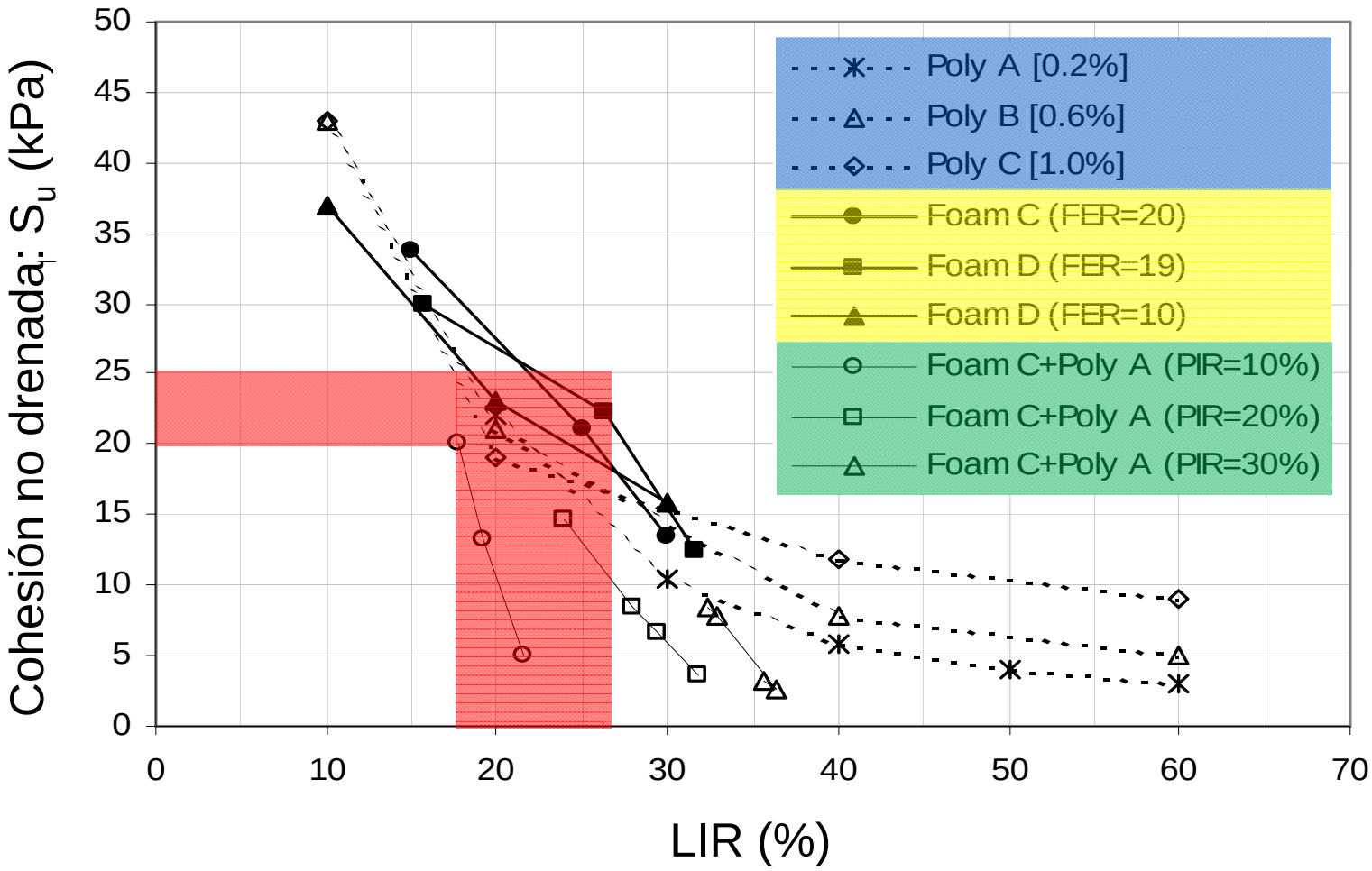
Cantidades de aditivos: definiciones

- Coeficiente de inyection de polímero: $PIR = V_{polímero}/V_{suelo}$
- Coeficiente de inyection de espuma: $FIR = V_{espuma}/V_{suelo}$
- Coeficiente de expansion de espuma: $FER = V_{liquido}/V_{espuma}$
- Coeficiente de inyección de liquido: $LIR = FIR/FER + PIR$

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur Management Engineering

3.1 Caracterización del material acondicionado

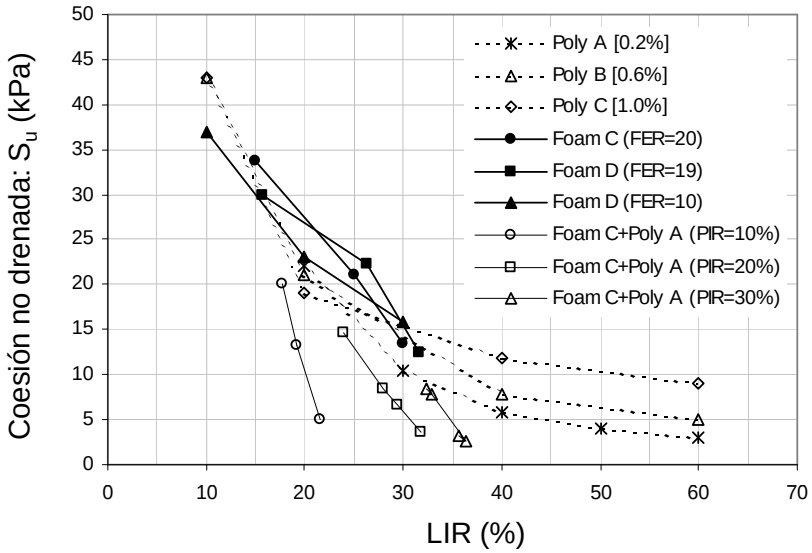
London Clay (S_u = 200 kPa) con varias combinaciones de aditivos



KÄLIN TOSCANO

Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

Efectos de los aditivos en la resistensia de arcilla de Londres

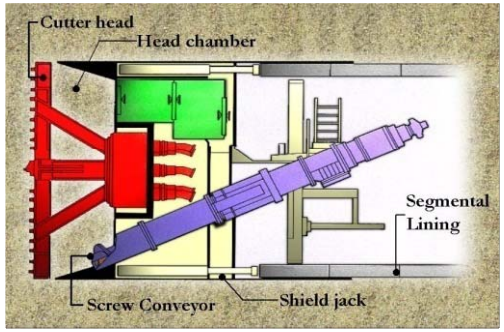


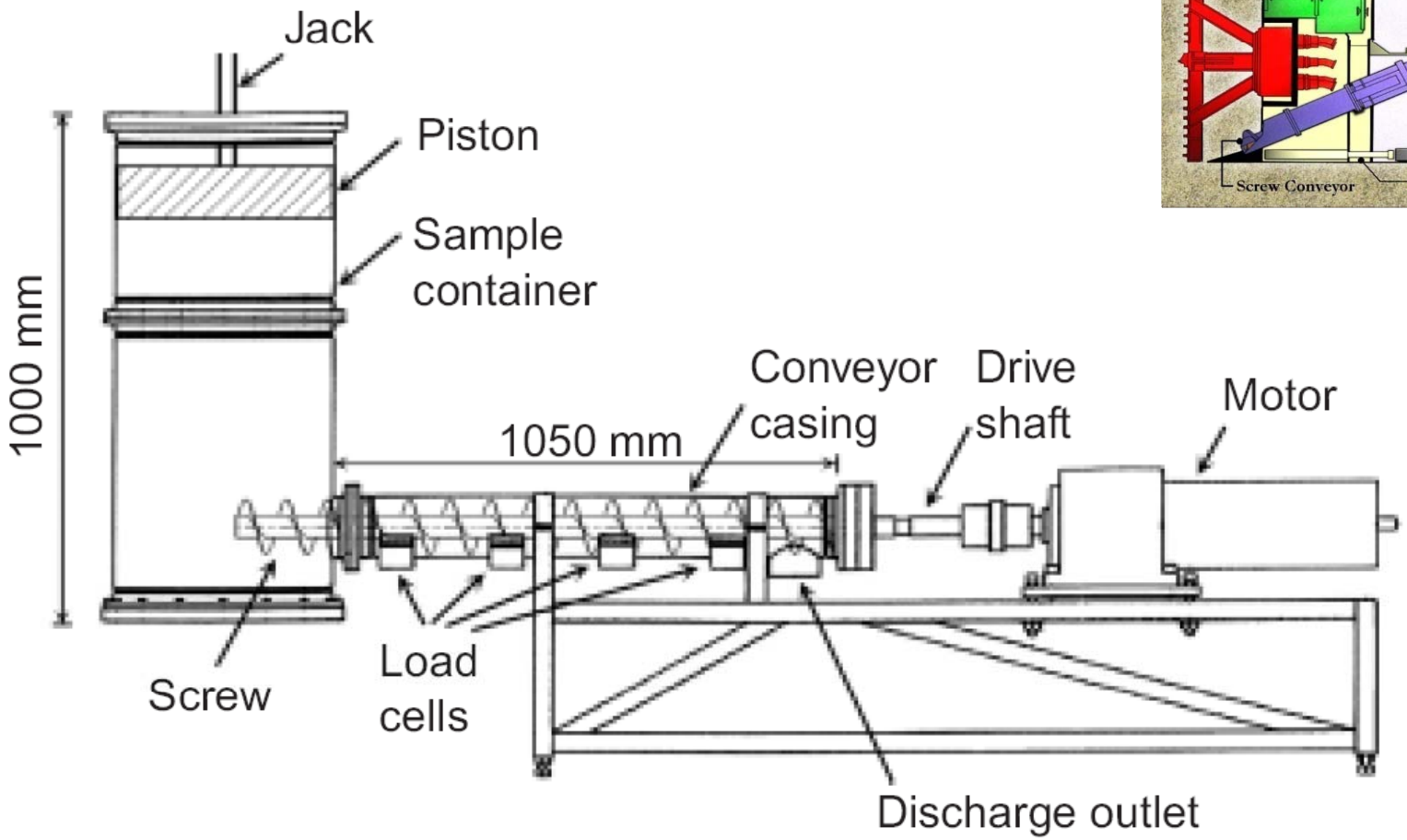
Observaciones claves:

- Un *LIR* de 20-25% es necesario para reducir S_u en el rango recomendado
- Espuma solo: *FIR* > 100%
- La dosis necesaria depende de los productos usados
- En arcilla, no parece que *FER* sea un factor determinante

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

Modelo físico de un tornillo sinfín (Merritt, 2004)

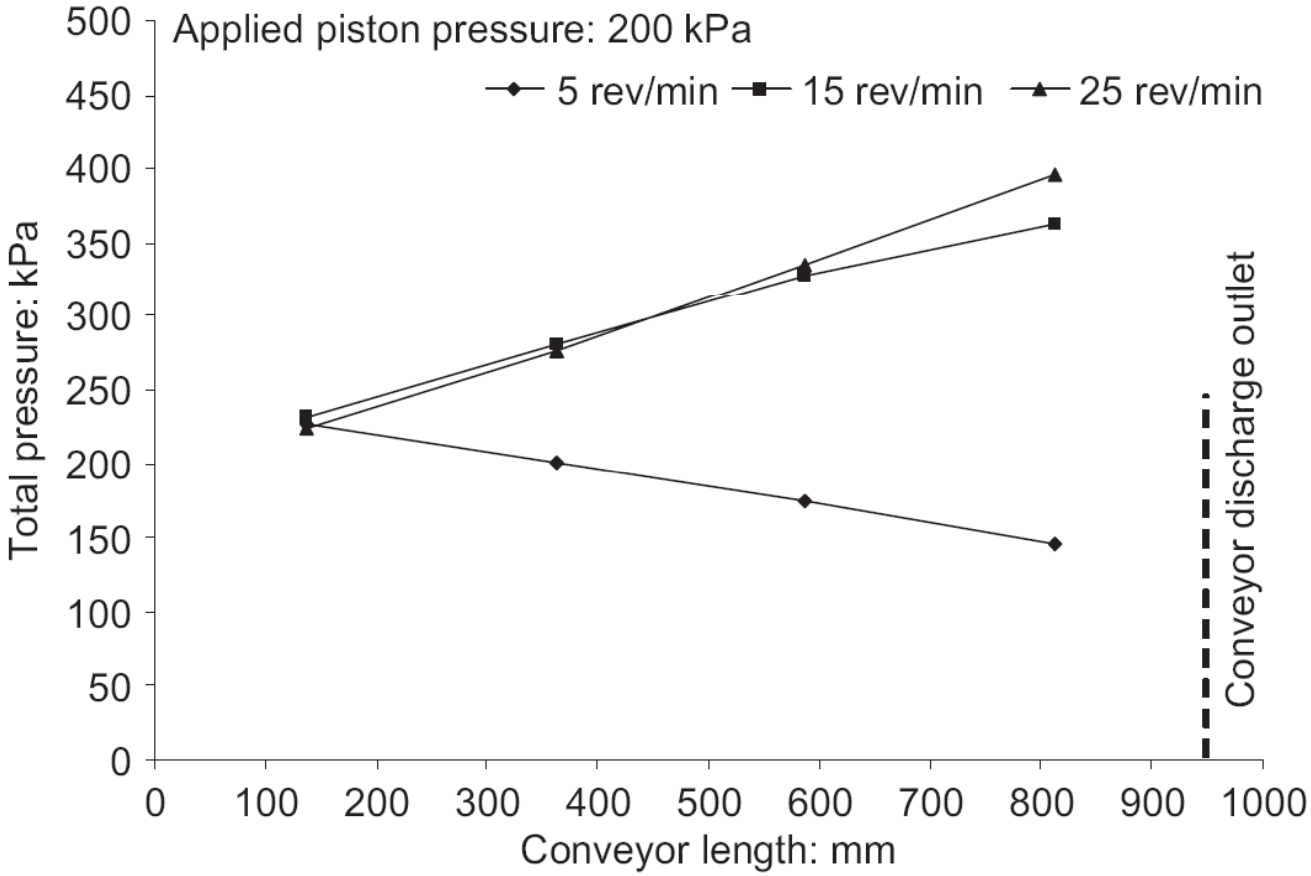


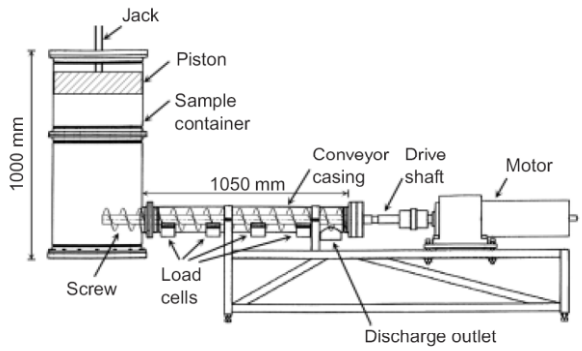


Merritt & Mair (2006): *Model tests*, Géotechnique 56(9).
Merritt & Mair (2008): *Theoretical model*, Géotechnique 58(2).

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

Modelo físico de un tornillo sinfín (Merritt, 2004)





Merritt & Mair (2006): *Model tests*, Géotechnique 56(9).

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

Modelo físico de un tornillo sinfín (Merritt, 2004)

Disipación de presíon:

$$P_L = P_0 + \left\{ \frac{\tau_c \cos(\theta + \phi_f)}{h \cos \phi_a \tan \phi_f} - \alpha \tau_c \left[\frac{2}{(t-e) \cos \phi_a \sin \phi_a} + \frac{1}{h \cos \phi_a \tan \phi_s} \right] \right\} L$$

Momento de giro:

$$T = \tfrac{1}{2} \pi D_c^2 L \tau_c \cos \theta$$

Flujo de material:

$$Q = A_x |v_{px}| = \frac{\pi}{4} \left(D_f^2 - D_s^2 \right) \frac{\pi D_f N \tan \phi_f \tan \theta}{\tan \theta + \tan \phi_f}$$

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

3.3 Vista general del programa de investigación

Monitoreo de campo

Análisis de la operación de tuneladoras EPB

Mediciones de asenta-mientos superficiales

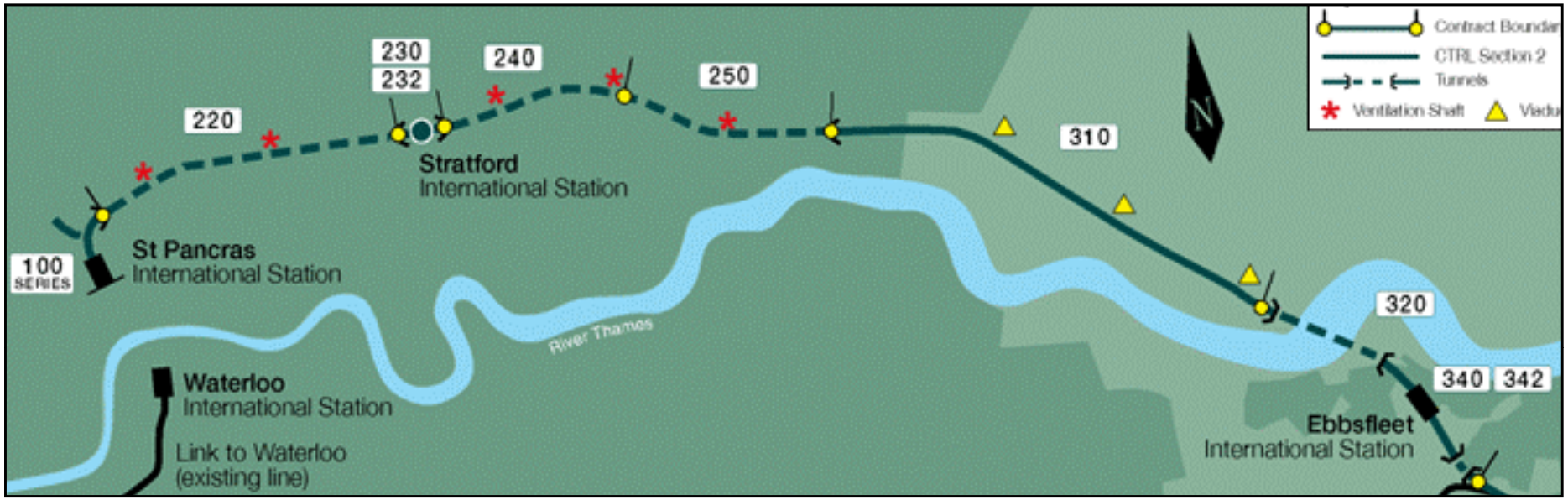
KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

Monitoreo de campo en el CTRL

- Descripción del proyecto
  - Descripción géneral
  - Geología y hidrología
  - Tunaladoras y monitoreo
- Observaciones principales
  - Uso de los aditivos
  - Control de la présion de cámera
  - Pérdida de volumen generada

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

3.3 CTRL 220: Project overview

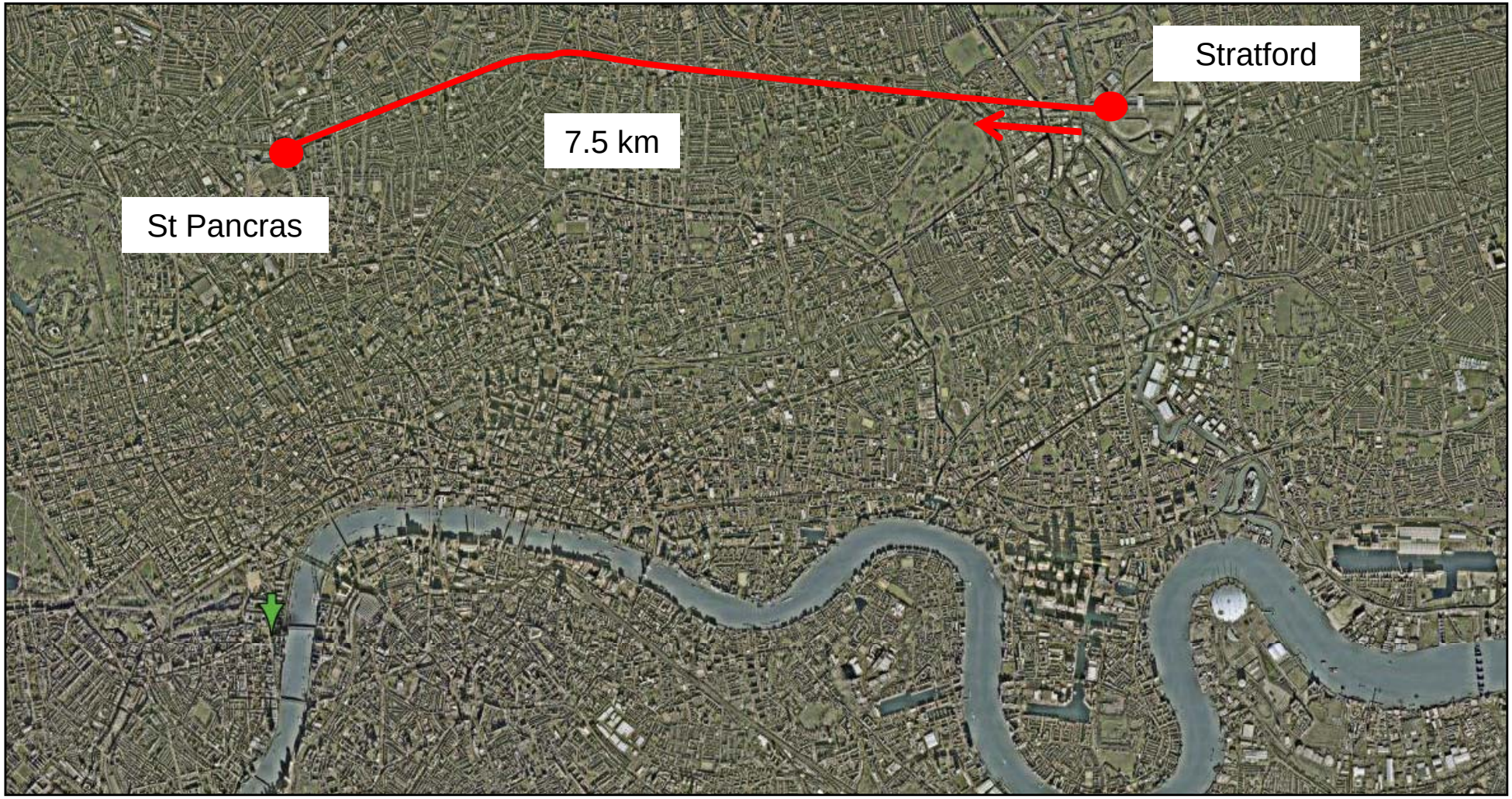


Datos principales:

- Contrato 220 (Nishimatsu/Skanska/Cementation JV)
- 7.5 km
- Tuneles gemelos
- Diámetro externo: 8.15 m

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

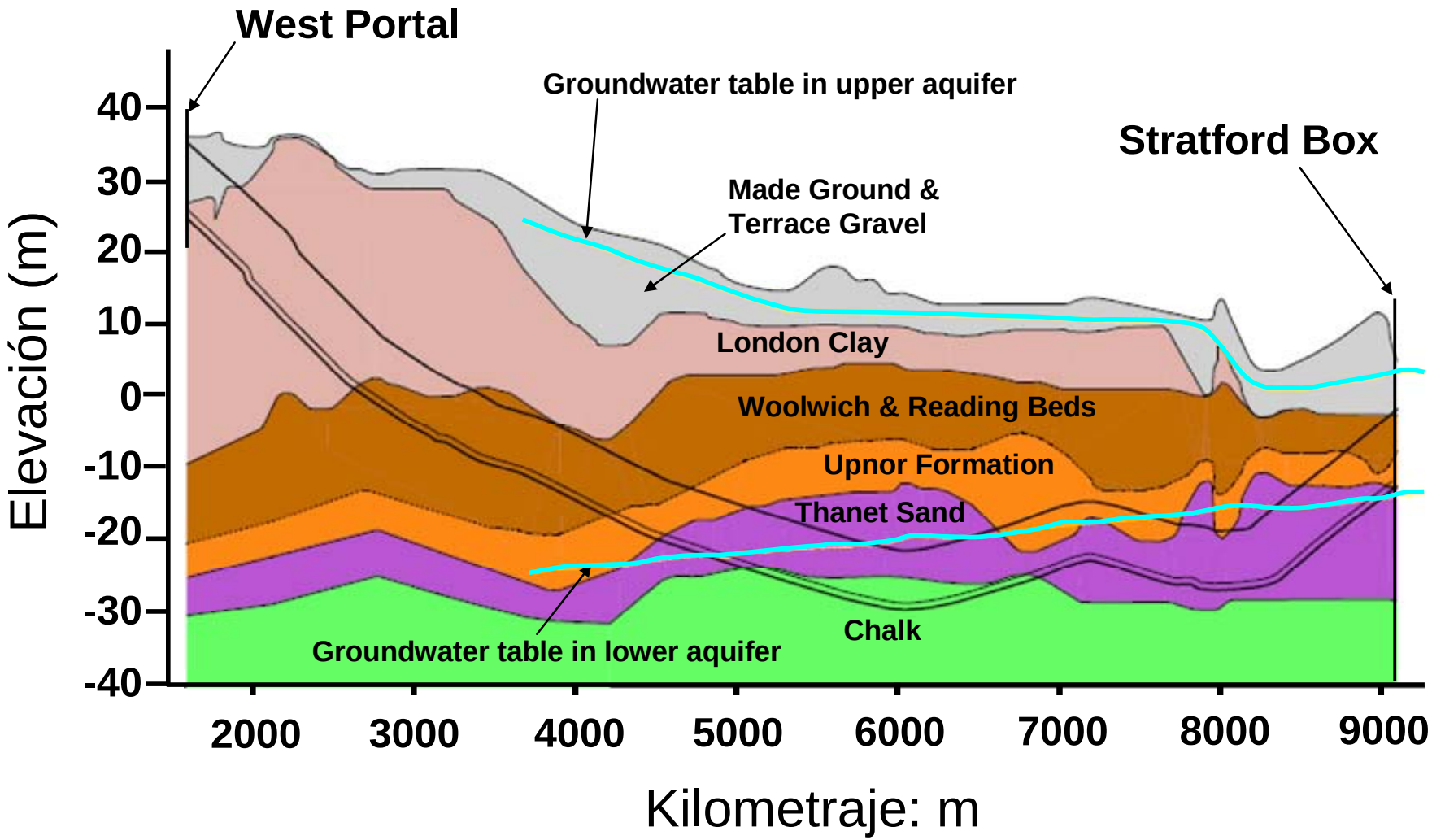
3.3 CTRL 220: Descripción general del proyecto



Google Maps

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

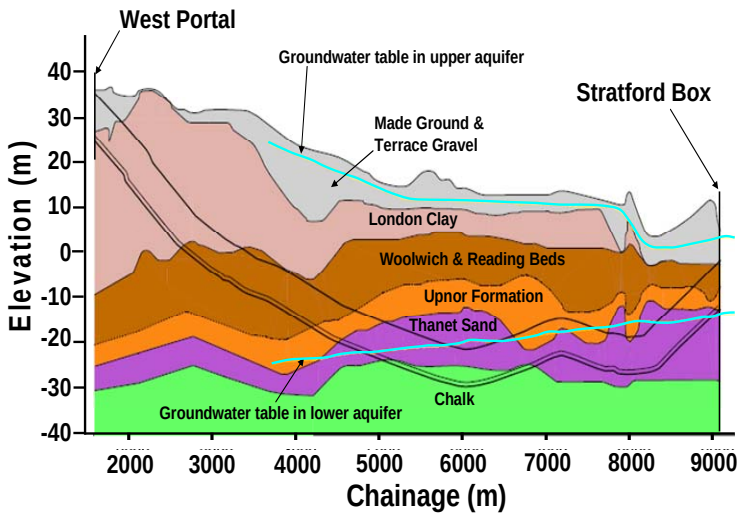
3.3 CTRL 220: Geología e hidrología



KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

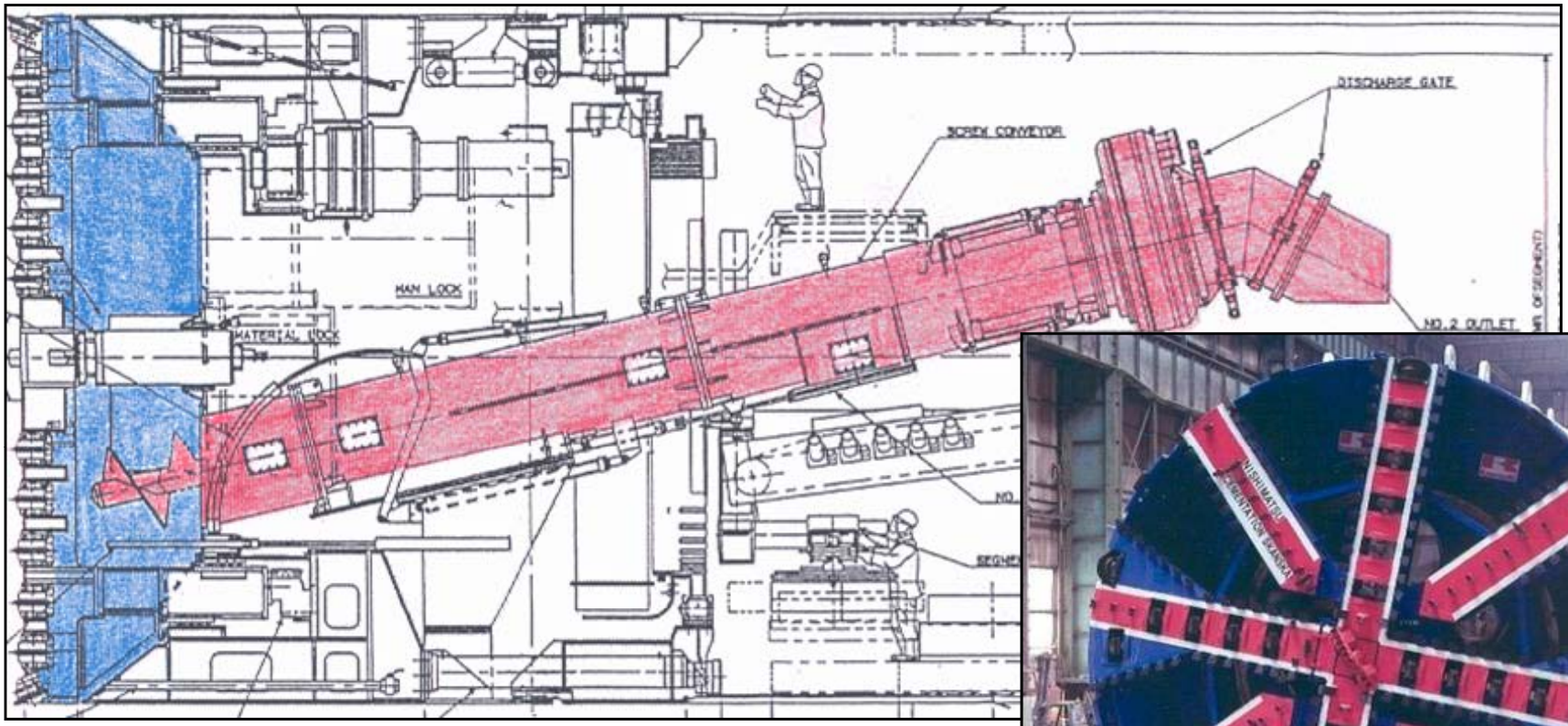
3.3 CTRL 220: Ground conditions at tunnel horizon

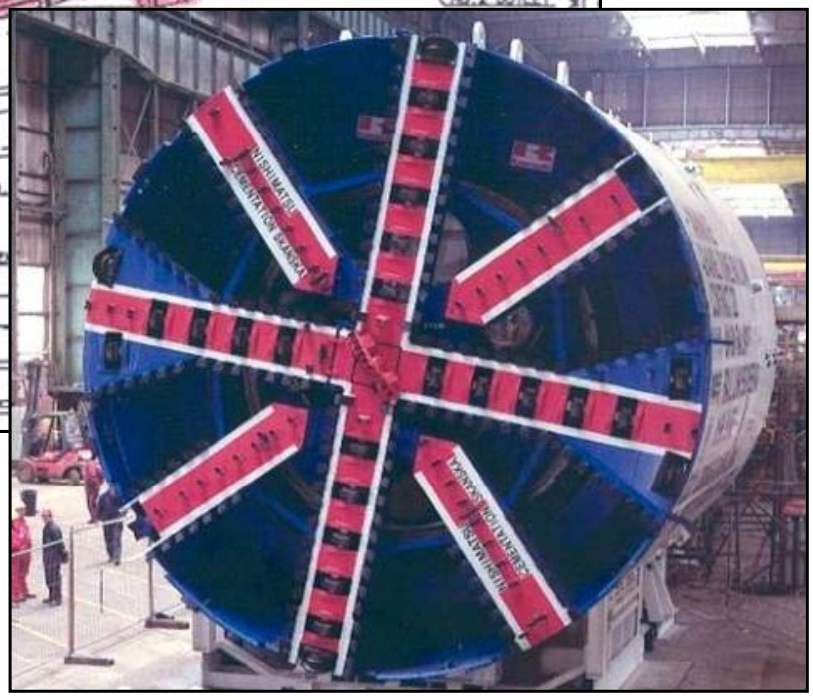
- London Clay
  - 6 – 40 m thick stratum
  - Firm to very stiff, closely fissured
  - High to very high plasticity
  - S_u increases with depth to 250 kPa
- Lambeth Group
  - 15 to 25 m thick stratum
  - Extreme lateral and vertical variability
  - Very stiff clays
  - Intermediate to high plasticity
- Thanet Sand
  - Structureless fine and medium silty sand
  - Permeability 1 x 10-8 – 1x10-5 m/s



KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

3.3 Tuneladoras EPB del contrato 220 CTRL





- Diámetro 8.2 m
- Longitud tornillo 15 m, diámetro 1.2 m
- Abertura de la rueda de corte 57%
- Toberas de espuma y polímero (8 + 2)
- Instrumentación

Cortesia de Rail Link Engineering

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

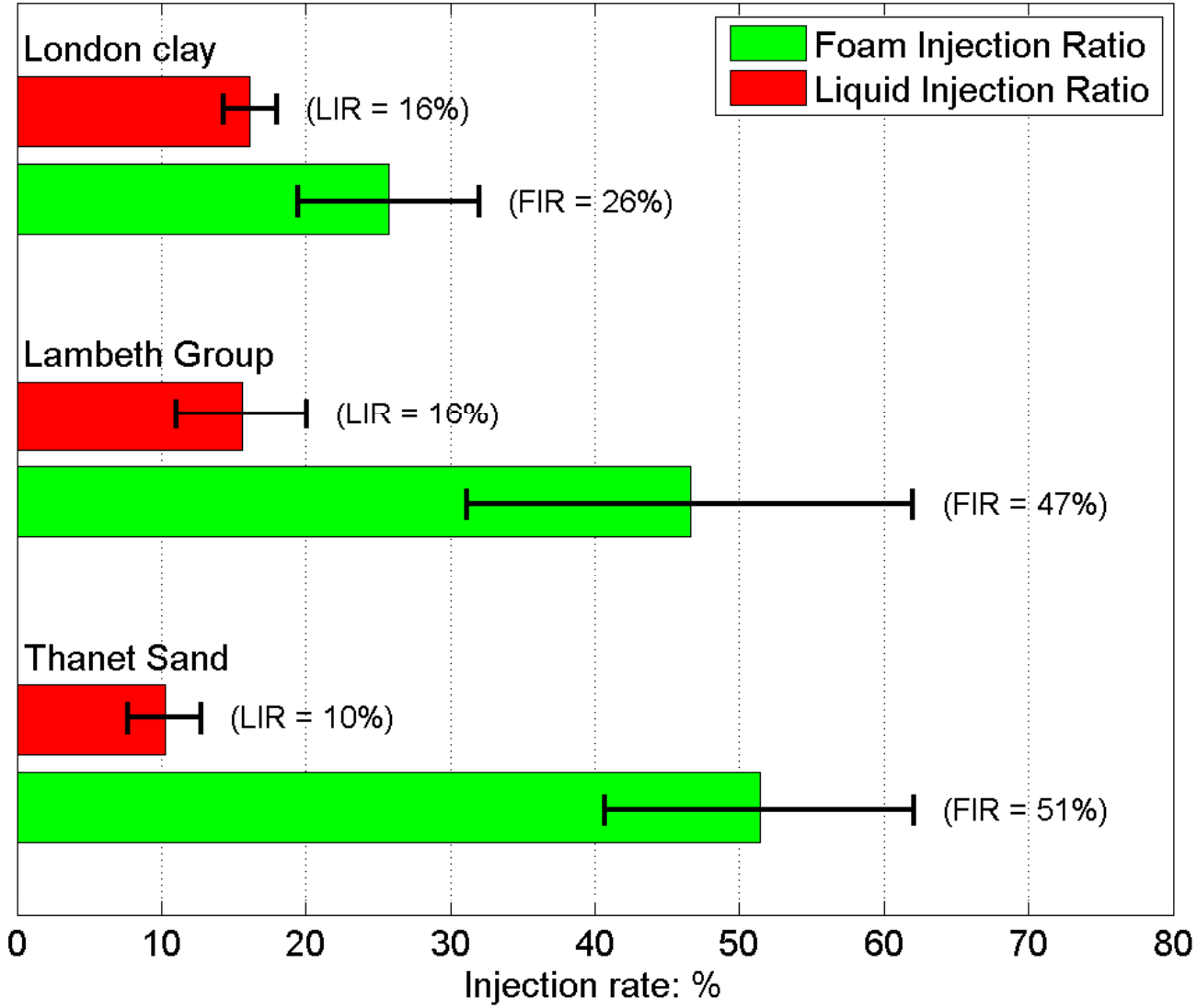
3.3 CTRL: Monitoreo de la tuneladoras

Observaciones principales

- Cantidades de aditivos usados en los principales tipos de suelos (FIR, FER, PIR, LIR)
- Efectos del acondicionamiento en el control de la presión de cámera en diferentes tipos de suelo
- Efectos de la presión de cámera en la pérdida de volumen estimada.

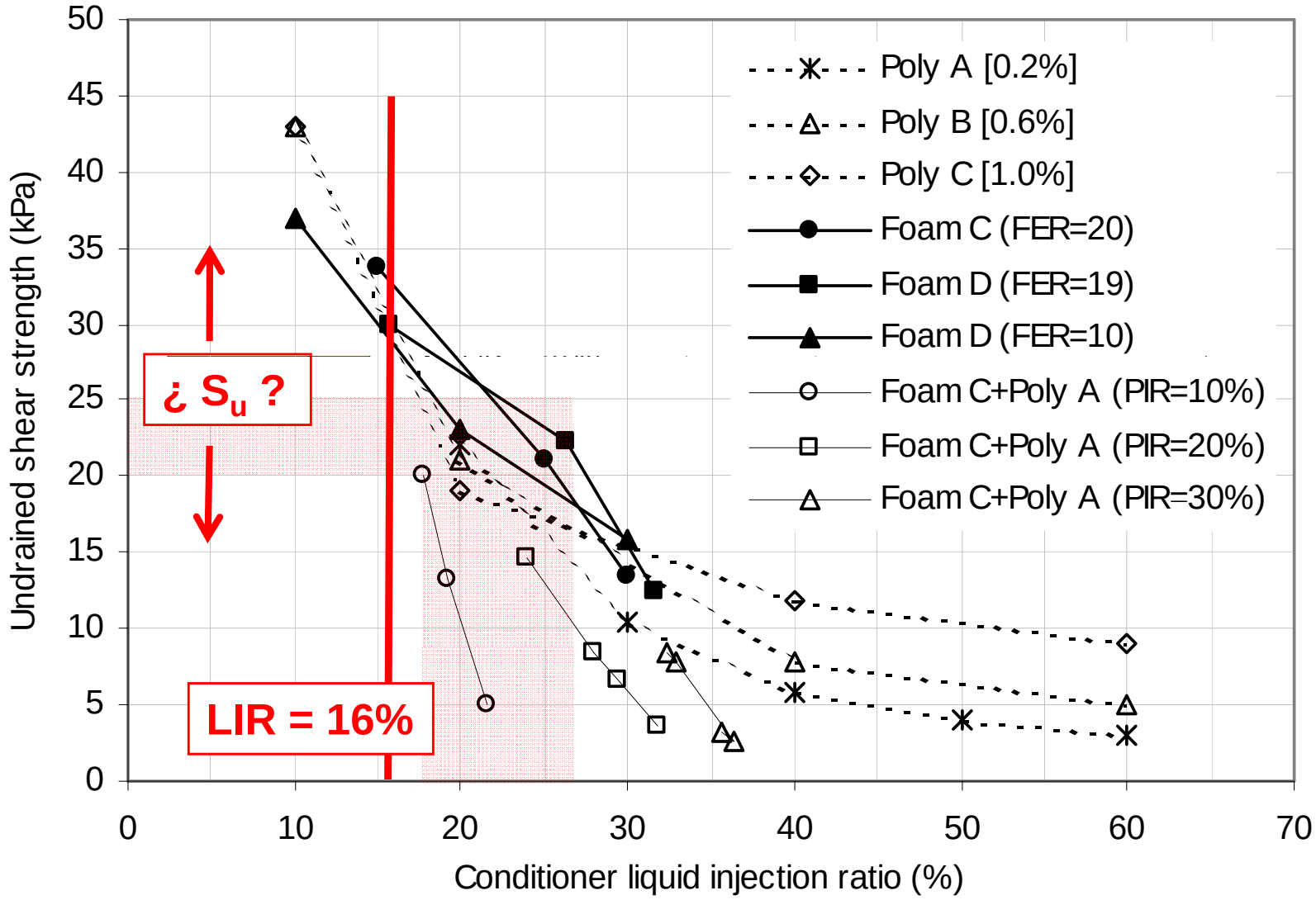
KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

3.3 Consumo de aditivos



KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur Management Engineering

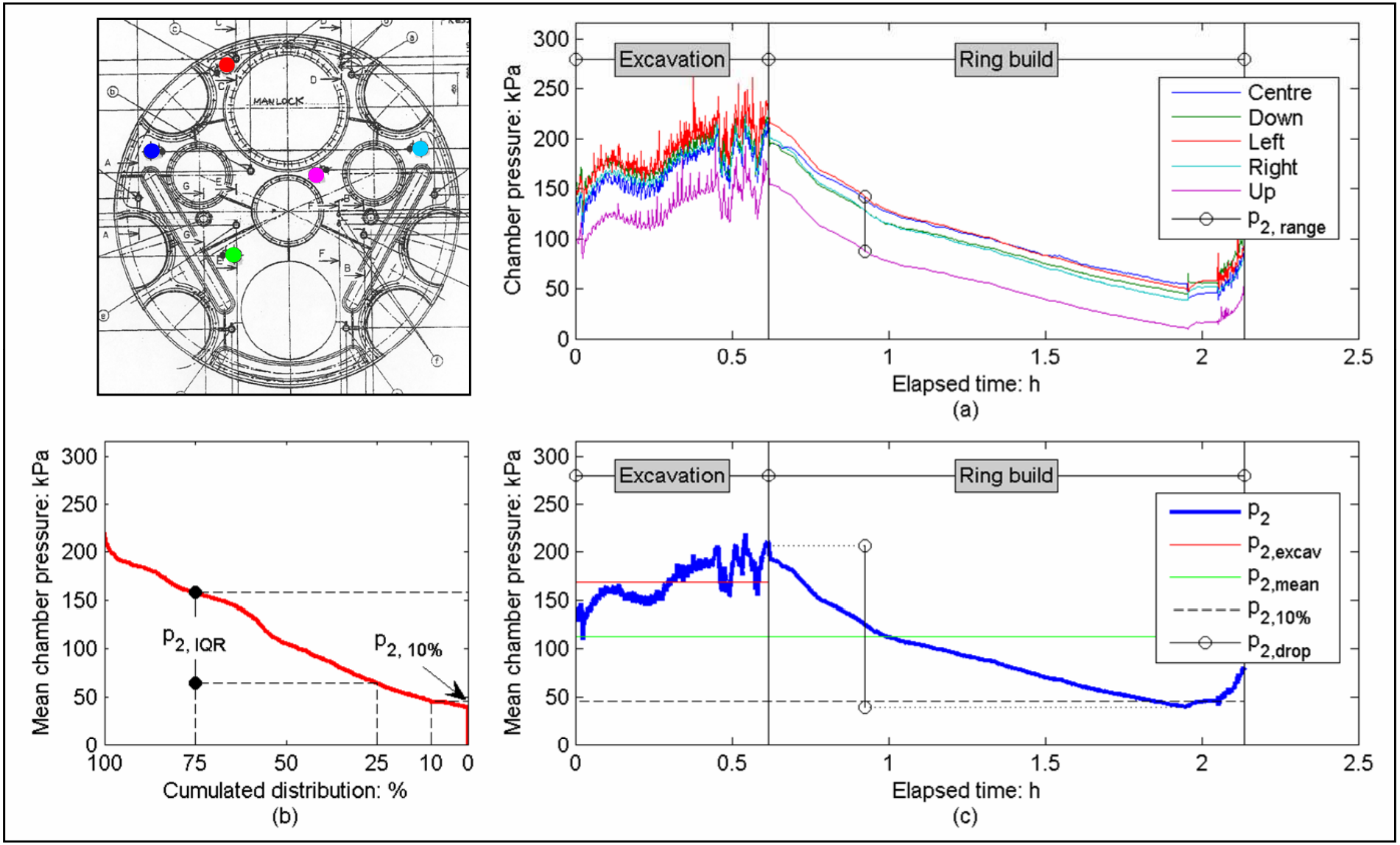
3.3 Consumo de aditivos



KÄLIN TOSCANO

Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

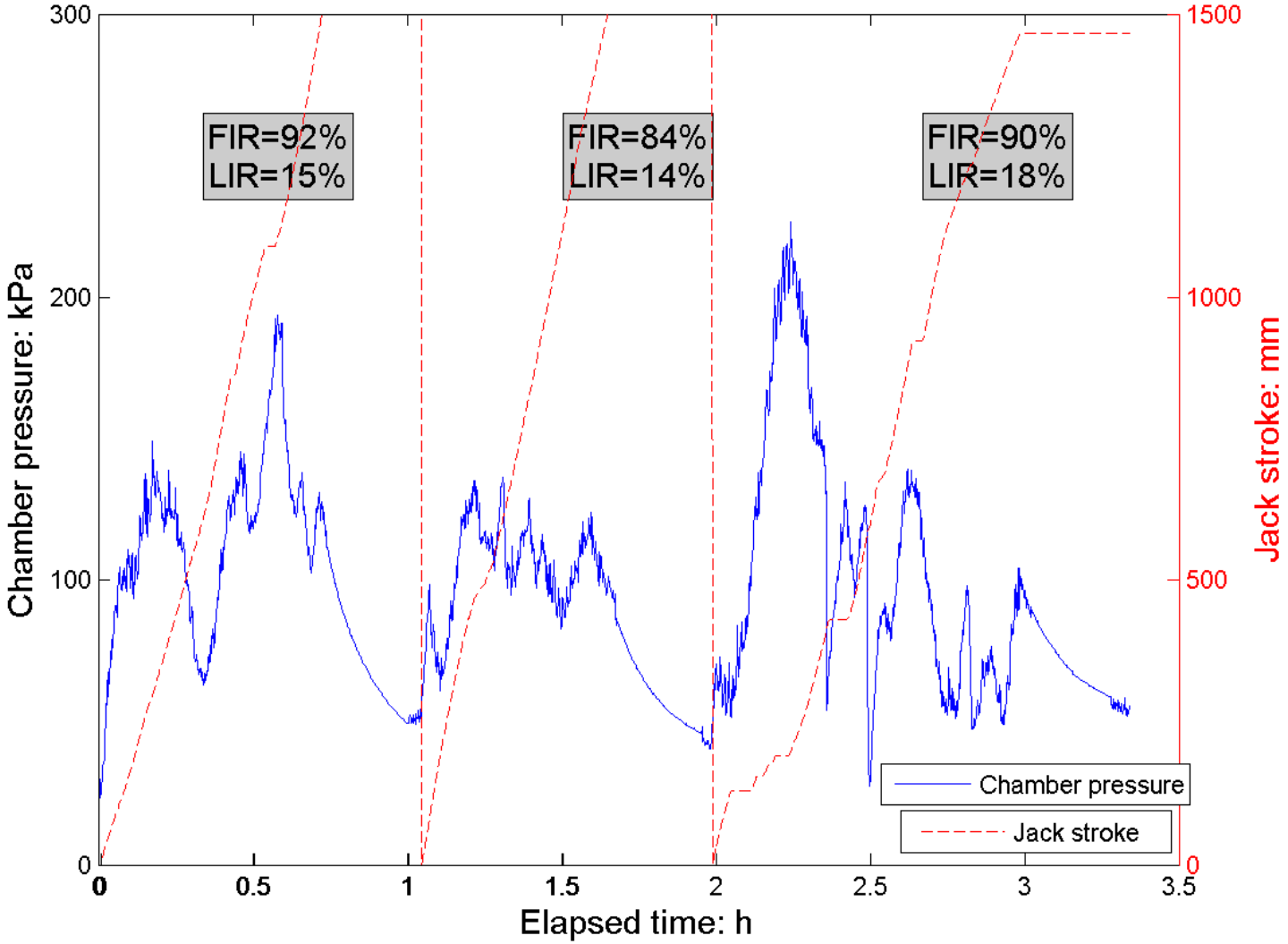
3.3 Definición de la presión de cámera (celda de carga)



Borghi, 2006

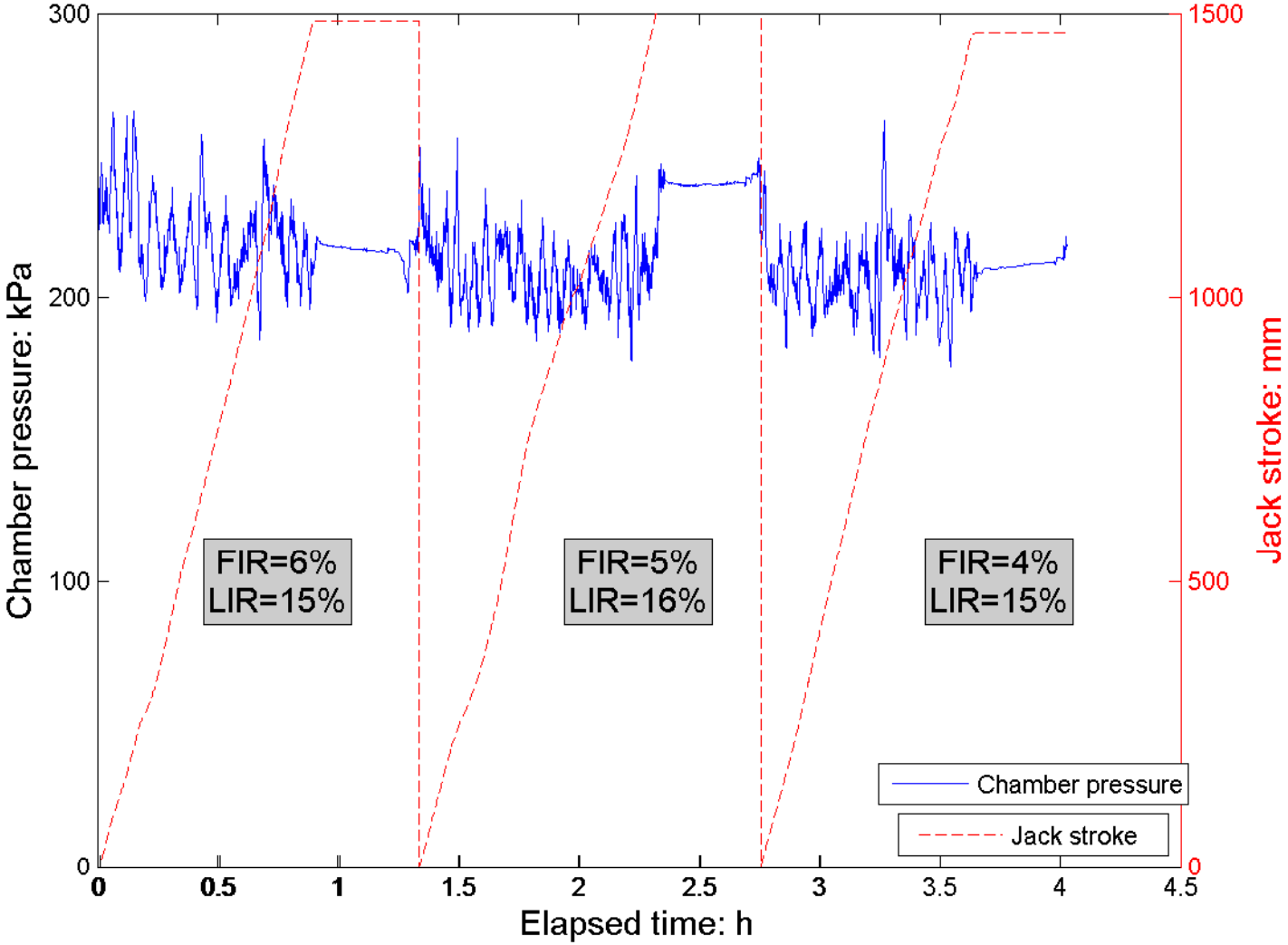
KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

3.3 Acondicionamiento y control de la presión - Lambeth Group



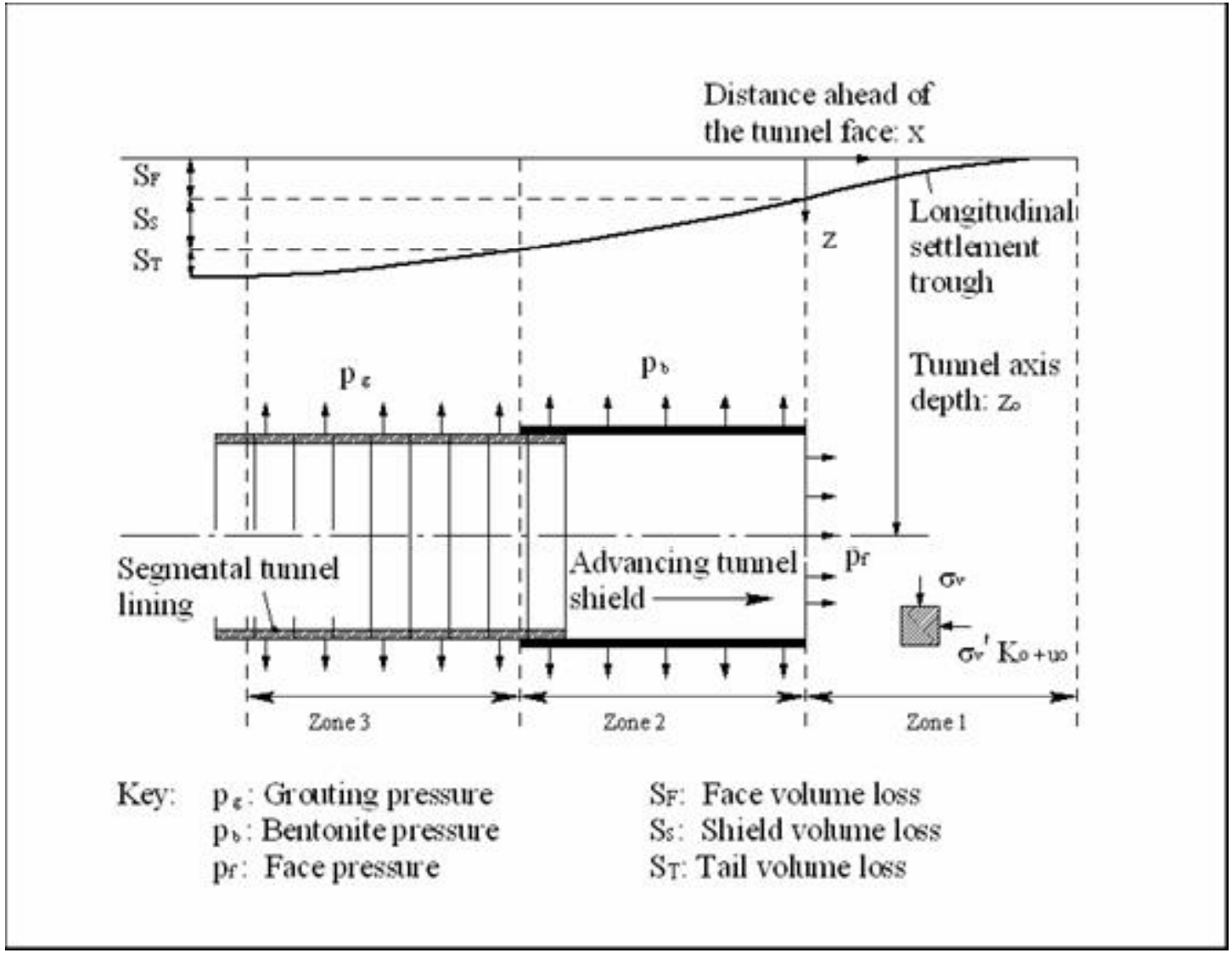
KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur Management Engineering

3.3 Acondicionamiento y control de la presión - London Clay



KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

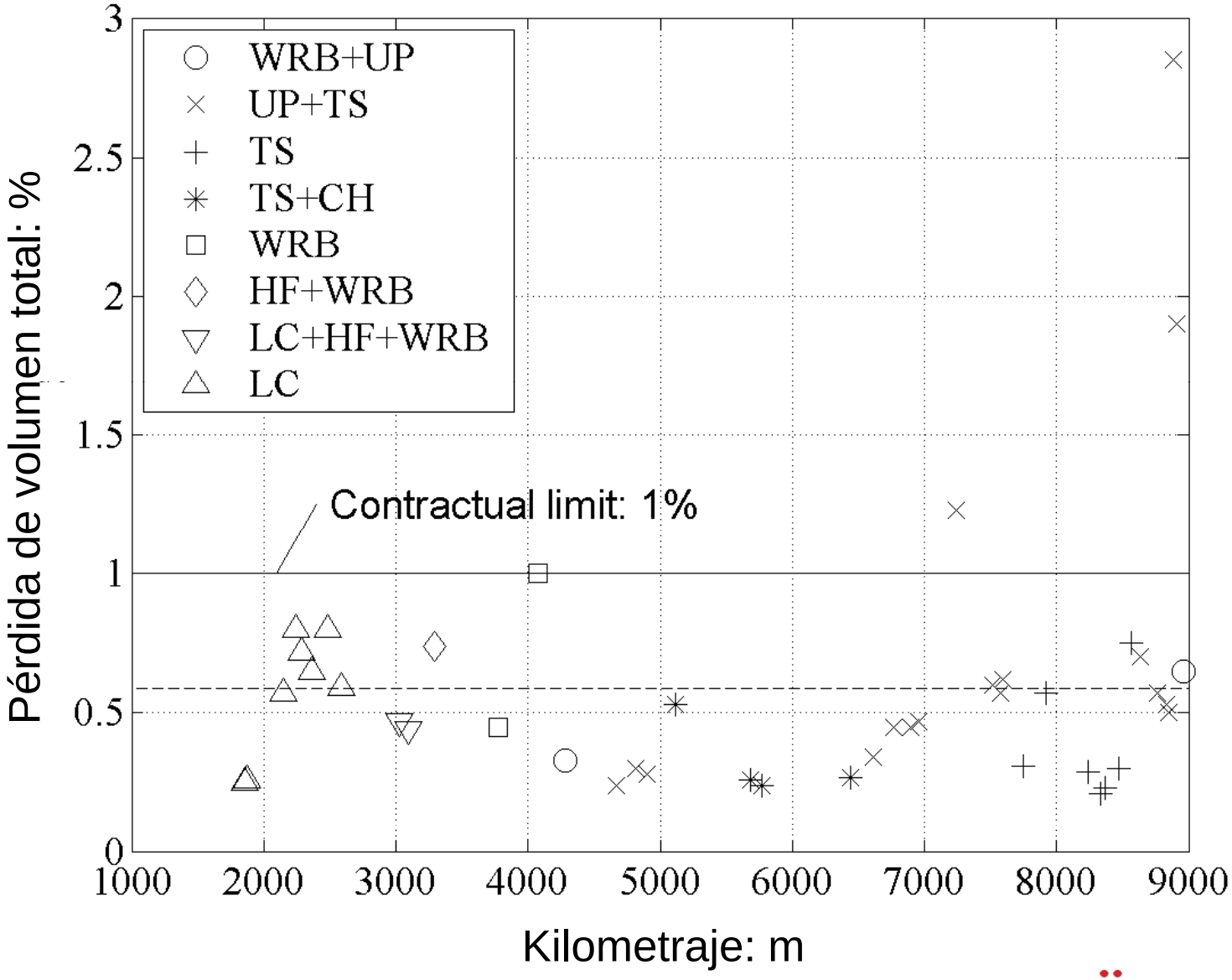
3.3 Componentes de la pérdida de volumen



Borghi, 2006

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

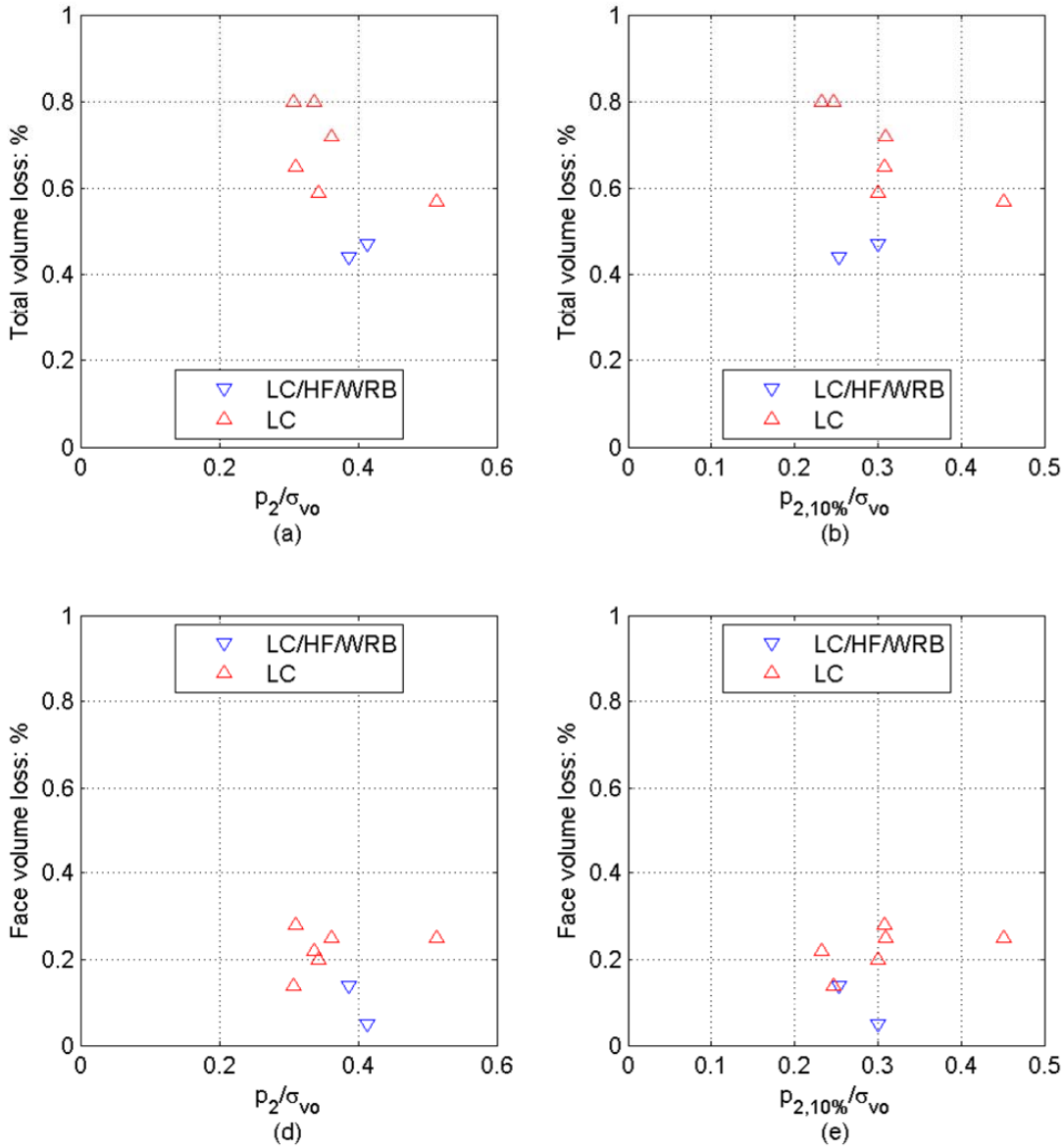
3.3 Pérdida de volumen estimada



KÄLIN TOSCANO

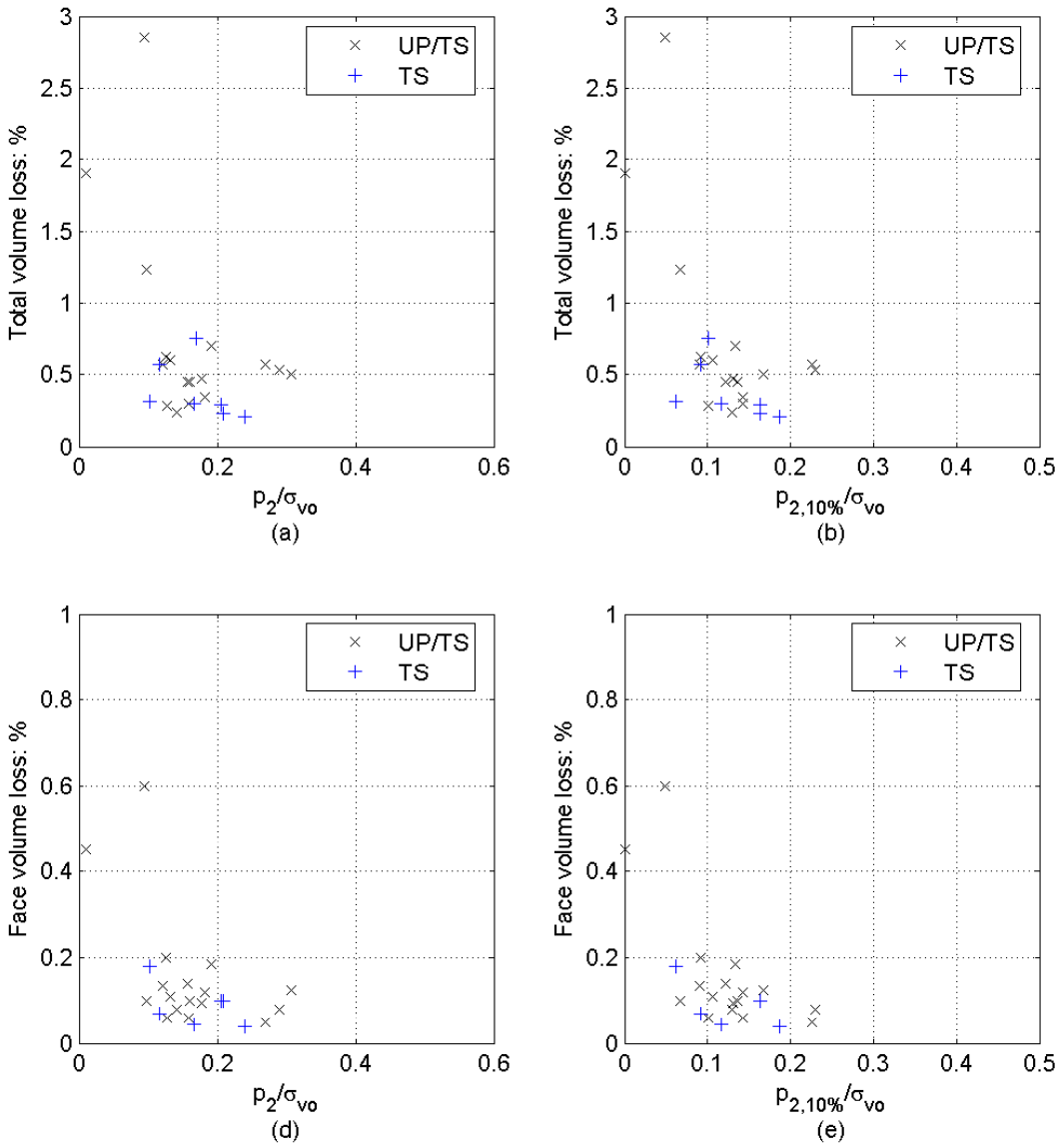
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

3.3 Pérdida de volumen y presión de suporte (en arcillas)



KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

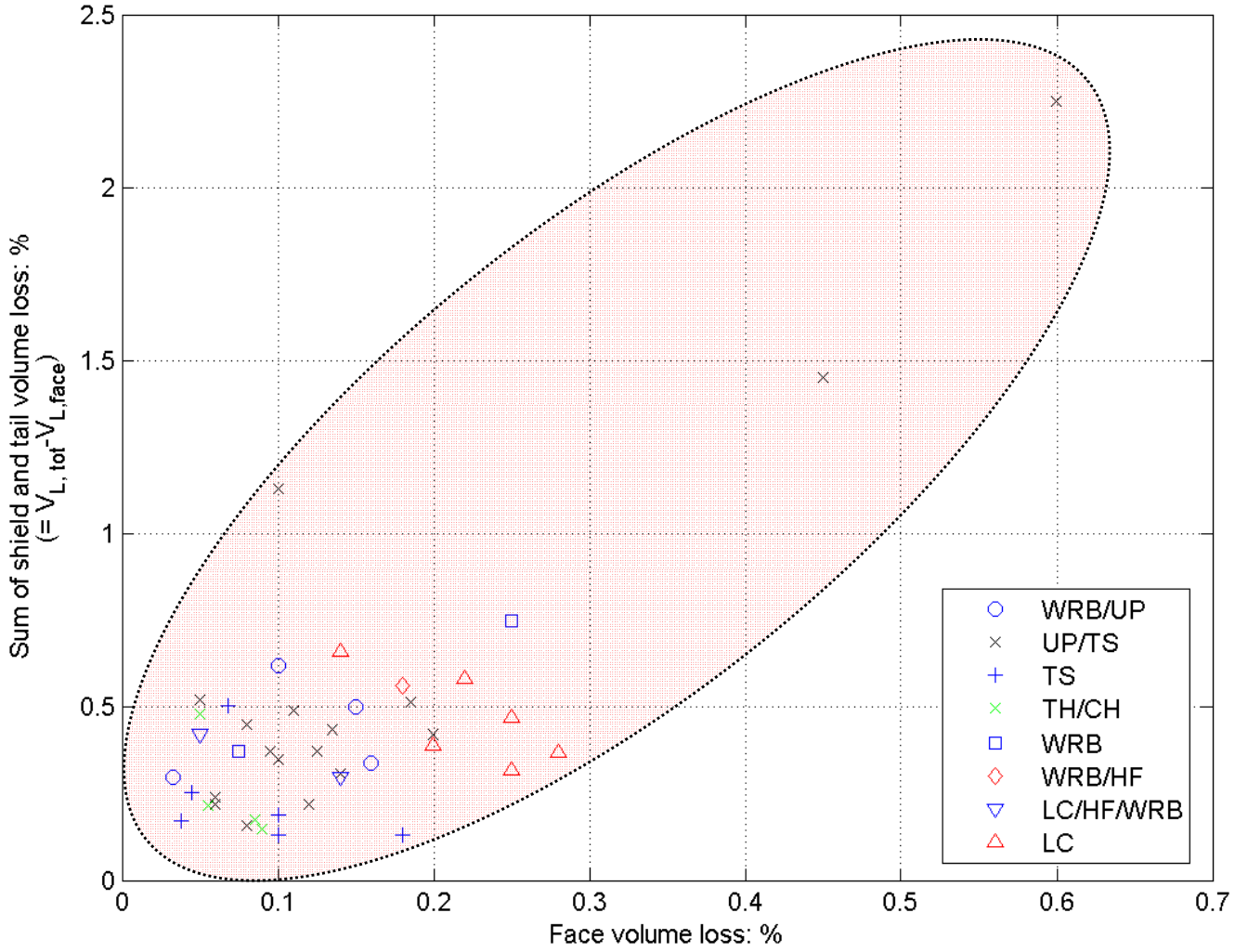
3.3 Pérdida de volumen y presión de suporte (en arena)



KÄLIN TOSCANO

Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

3.3 Pérdida de volumen y presión de suporte



KÄLIN TOSCANO

Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

4. Conclusions principales

Acondicionamiento del suelo

Pérdida de volumen

Conclusiones generales

4. Conclusiones principales

Acondicionamiento del suelo

1. En arcillas, dosis excesivas de espuma pueden ocasionar un comportamiento de la tuneladora difícil de controlar. Sin embargo, la falta de acondicionamiento no permitió la operación en modo de frente cerrado.

2. El comportamiento observado en el laboratorio fue confirmado con el observado en la obra: el *FER* no parece ser un factor determinante, lo que sugirió que la parte líquida de la espuma tiene (en arcillas) mayor importancia.

3. En la arcilla de Londres, la adición de 10% de solución polimérica, permitió mantener presiones estables de 220 kPa y alcanzar una operación estacionaria con poca o sin reducción de la presión durante la colocación de los anillos.

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

4. Conclusiones principales

Asentamientos / pérdida de volumen

1. En la mayor parte de los 15 km excavados, se alcanzó una pérdida de volumen média del 0.5%, inferior al rango generalmente observado para excavaciones de frente abierto en Londres (hasta 3.5%).

2. En las condiciones particulares del contrato 220, la pérdida de volumen no tiene una relacion clara, ni con la relajación de presiones frente al túnel, ni con los valores mínimos de presión ($p_{10\%}$).

3. Sin embargo, se observó claramente que todas las ocurrencias de pérdida de volumen más altas fueron debidas a presiones de cámera excesivamente bajas.

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

4. Conclusiones principales

General conclusions

1. Operación de las tuneladoras en modo de frente cerrado ha sido posible en todos los típos de suelos encontrados en el contracto 220 del CTRL y, en particular, en las arcillas rigidas y plásticas.

2. Simples procedimiento de laboratorio contribuyen a seleccionar adecuados tipos y cantidades de aditivos

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

Agradecimientos

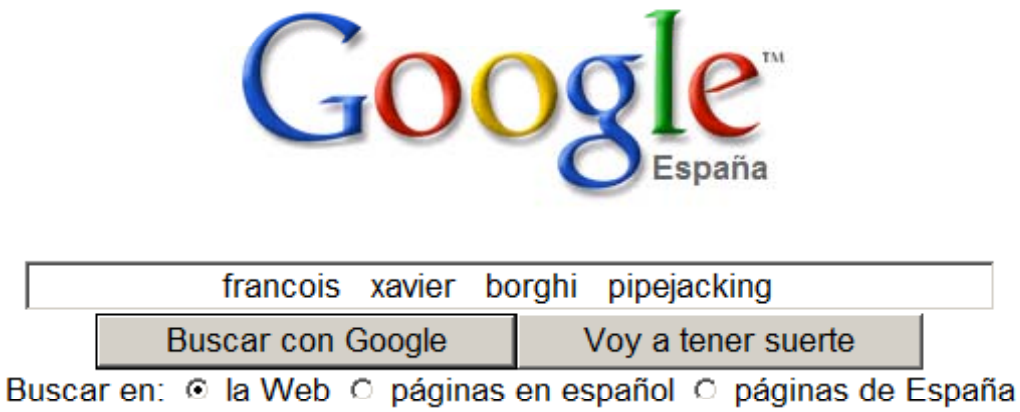
- Universidad de Cambridge – Profesor R.J. Mair
- Dr. A. Merritt & Dr. J. Wongsaroj
- EPSRC, Pipe Jacking Association & British Tunnelling Society
- Nishimatsu Construction / Skanska / Cementation JV
- Nuttall / Wayss & Freitag JV

KÄLIN TOSCANO
Infrastruktur ■ Management ■ Engineering

Gracias

xavier.borghi@kaelintoscano.com

5. Literatura y referencias...



www.pipejacking.org/documents/X.BorghiPhD.2006.pdf