

21) LAUREANO CORNEJO ÁLVAREZ

Año 1999.

Publicación :

" La excavación mecánica de túneles en terrenos blandos y su evolución histórica".

GEOCONSULT

Ingenieros Consultores, S.A.



AENOR



Gestión Ambiental
CGM - 99177



MADRID

Valentin Beato 24, 4º pl., Ofic. 8B
28037 Madrid
Tel.: 91 304 18 46
Fax: 91 304 20 47

BILBAO

Francisco Macia 11, 7º Pt. 8
48014 Bilbao
Tel.: 94 447 47 03

www.geoconsult.es
geoconsult@jet.es

La excavación mecánica de túneles en terrenos blandos y su evolución histórica

Laureano Cornejo Álvarez
Director de GEOCONSULT



GEOCONSULT
Ingenieros Consultores, S.A.

LA EXCAVACIÓN MECÁNICA DE TÚNELES EN TERRENOS BLANDOS Y SU EVOLUCIÓN HISTÓRICA

Laureano Cornejo Alvarez
Director de GEOCONSULT

1.- INTRODUCCIÓN

Desde la noche de los tiempos, el hombre se ha encontrado con la necesidad de utilizar los espacios subterráneos naturales como hábitat de vida.

Las pequeñas sociedades rurales que se fueron formando, principalmente en Egipto y en Mesopotamia (3000 años a. C.) fueron necesitando para su desarrollo, fundamentalmente agrícola, realizar trabajos de canalización del agua para llevarla a las zonas cultivadas y, a la vez, para desecar grandes extensiones de suelos pantanosos. En la ejecución de estas obras, el hombre se enfrentó con la necesidad de excavar tanto materiales rocosos duros, como materiales arcillosos blandos.

2.- EVOLUCIÓN HISTÓRICA

La Humanidad a lo largo de su evolución, ha ido desarrollando y utilizando, de acuerdo a su nivel de desarrollo, diferentes técnicas de eficacia creciente en la excavación de rocas y suelos.

En esta evolución tecnológica ocupan un lugar destacado determinados avances tecnológicos como:

- **SIGLO VIII.** *El descubrimiento de la pólvora negra* (atribuida a los árabes)
- **1690.** Generalización del uso de la pólvora negra para usos civiles hasta la mitad del siglo XIX
- **1814.** *Primera locomotora de vapor* (Stephenson)
- **1844.** *Primeros martillos perforadores de aire comprimido* (Brunton)

- **1874**, J.H. Greathead diseña *el primer escudo que utiliza aire comprimido* como fluido estabilizador del frente; este escudo no se llegó a utilizar.
- **1879**, De Witt Haskins utiliza por primera vez el aire comprimido a 2,4 bar en la construcción del túnel bajo el río Hudson, en New York y del túnel Antwerp Docks utilizando dovelas de fundición.

Paralelamente, al uso del aire comprimido, se estudian otras técnicas de estabilización del frente:

- **1874**. H. Lorenz *propone utilizar un lodo bentonítico a presión* contra el frente de excavación.
- **1896**. H.H. Dlarymple-Hay utilizan por primera vez *la arcilla para estabilizar el frente en terrenos no cohesivos*. Esta idea es considerada como la precursora del diseño de los escudos de tierras muy posteriormente desarrolladas principalmente en Japón.

Desde finales del Siglo XIX hasta rebasada la mitad del Siglo XX (1959-1960), el desarrollo de escudos presurizados, sufrió un importante parón de más de 70 años. A partir de esta fecha vuelve a prestarse atención a nuevos diseños de escudos, aplicándose en ellos los nuevos adelantos tecnológicos.

- **1959-1960**. Se produce un salto tecnológico en el diseño y construcción de los escudos presurizados realizándose la *construcción del escudo de lodos "Teredo"* diseñado por C. Gardner que se utilizó en la excavación de un túnel en la ciudad de Houston, Texas.
- **1963**. Sin embargo, el mayor avance tecnológico en el diseño y construcción de los escudos presurizados se produce en Japón a partir del año 1963. Las técnicas japonesas desarrollan, casi al mismo tiempo, los métodos de estabilización del frente mediante lodos bentoníticos aplicados a presión contra el frente, técnica utilizada en los escudos de lodos (slurry shield) y

aportación al incorporar en su diseño todas las técnicas disponibles (aire comprimido, lodos y las propias tierras excavadas).

- **1989.** La firma Herrenknecht, siguiendo los desarrollos del escudo mixto, construye el *primer escudo convertible* que puede trabajar en las distintas modalidades como escudo de tierras, escudo de lodos, escudo de aire comprimido y como tuneladora de roca. Se trata de un escudo muy versátil que permite, con pequeñas modificaciones que se realizan en el propio túnel, cambiar de un modo de funcionamiento a otro.
- **Finales de los años 80.** En los países industrializados y en Europa en particular, se produce un incremento del número de proyectos en medio urbano relacionados principalmente, con la construcción de las redes de Metro en las ciudades de más de un millón de habitantes. En las **Tablas 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4**, se relacionan algunos de los proyectos más importantes ya realizados o en fase de realización.

En el entorno del año **1990**, la utilización de los escudos presurizados, se extiende a la excavación de estaciones y a otro tipo de excavaciones como redes de colectores, redes de cables, galerías de servicio, ...

Se pretende abaratar los costes de ejecución de las obras subterráneas, incrementando al mismo tiempo su nivel de seguridad.

Los momentos principales en la reciente evolución de los escudos presurizados durante la última década vienen indicados en la **Tabla 1**; entre éstos podemos destacar :

- **1987.** *Primer escudo de dos cabezas* inbricadas en forma de antejojo, *sistema "DOT"* fabricado por la firma japonesa IHI.
- **1990.-** Se inicia en Japón, el diseño de escudos multicirculares de varias cabezas.
- **1994.-** Las firmas japonesas Mitsubishi y Kawasaki construyen *escudos de tres cabezas circulares* para la construcción de estaciones en el metro de Tokio.

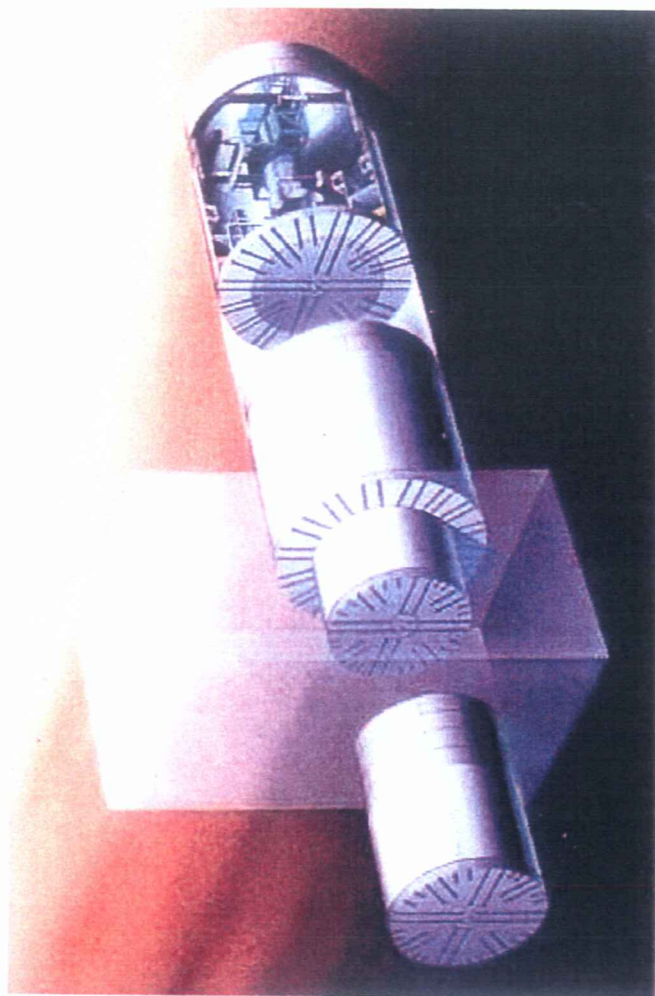
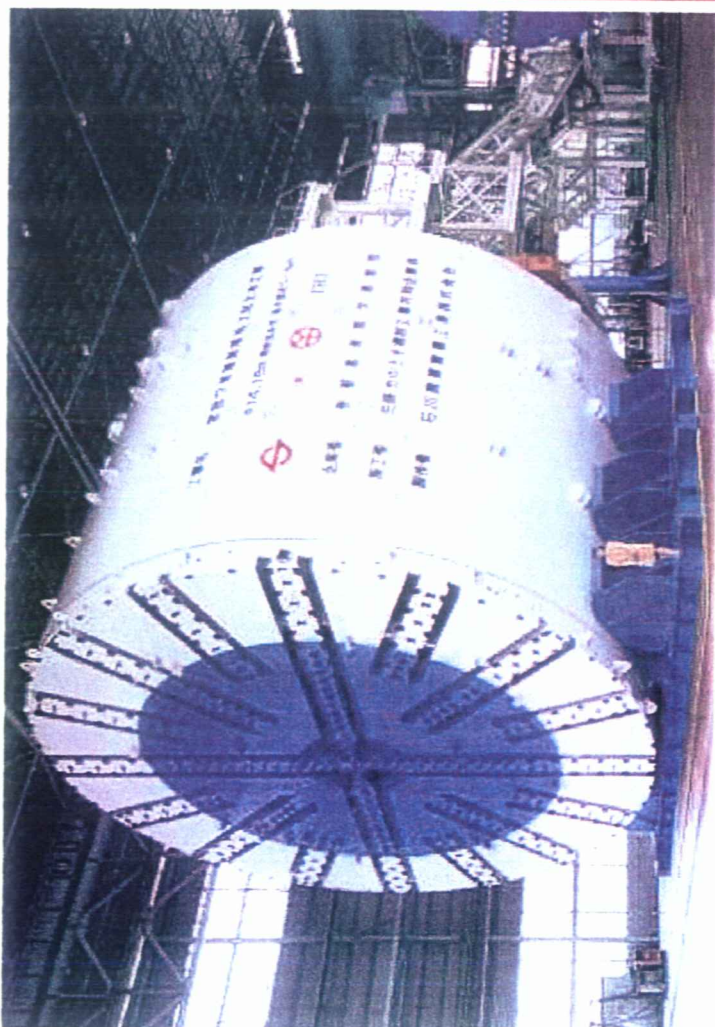


Figura 1

ESCUDO NODRIZA (Ø 9.50 m.)

Algunas de estas realizaciones son:

- **1996.** Las firmas Mitsubishi y Kawasaki construyen *escudos de lodos y tierras de cabezas circulares múltiples*. (**Figura 2**).
- **1996.** La firma IHI construye un *multimicroescudo* (NMST).
- **1997.** La firma Kawasaki construye *escudos de lodos adosados de cabeza circular "Twister"* que deslizan uno sobre el otro pudiendo adoptar cualquier posición en el espacio.

Finalmente, en la **Tabla 3**, se resumen, en orden cronológico, las técnicas complementarias que han tenido una mayor influencia en el desarrollo tecnológico de los escudos presurizados.

AÑO	INVENTOR/ FABRICANTE	TIPO DE MAQUINA	PROYECTO	OBSERVACIONES
1818	M.I. Brunel	Escudo circular, revestimiento con dovelas de fundición	1er. Tunel bajo el Támesis	Problemas técnicos, entradas de agua en el túnel
1828	Colladon			Propone el uso de aire comprimido en lugar del escudo de Brunel. Aun no se conocen bien las propiedades del aire comprimido
1831	Lord Cochrane			En su patente, propone utilizar el aire comprimido para estabilizar el frente
1861		Utilización de las perforadoras de aire comprimido	Túnel de Mont Cenis (12,8 Km.)	
1864	P.W. Barlow			Patenta la inyección del espacio anular entre terreno y dovela
1874	J.H. Greathead			Propone transportar los productos excavados hidráulicamente convirtiéndolos previamente en lodos
1874	J.H. Greathead	Diseña un escudo que utiliza aire comprimido para estabilizar el frente en su parte superior		No llegó a utilizarse
1874	H. Lorenz			Propone estabilizar el frente de excavación aplicando, a presión sobre éste, una mezcla de bentonita y agua
1879	De Witt Haskins		Túnel bajo el río Hudson. New York	Primera utilización del aire comprimido sin escudo. Sección de 5,5 m. x 4,9 m. de sección. Presión de aire: 2,4 bar. Pérdida de aire a través de los limos de la zona superior.
1879	De Witt Haskins		Túnel, Antwerp Docks	Primera utilización del aire comprimido sin escudo. Sección de 1,5 m. x 1,20 m. Dovelas de fundición.
1959/ 60	C. Gardner	Escudo de lodos "Teredo"		
Años 60		Desarrollo de las modernas máquinas de ataque puntual, rozadoras		
1961	Campeonon Bernard	Escudo con cámara delantera presurizada con aire comprimido		El personal no trabaja en atmósfera presurizada
1963	Sato Kogyo Company	Primer diseño de escudo de tierras (EPB)		
1964	Robbins Company	Escudo de cabeza giratoria en forma de estrella de 10,30 m. de diámetro con cámara delantera presurizada con aire comprimido	Metro de Paris	El personal no trabaja en atmósfera presurizada
1965		Escudo de lodos máquina parcialmente presurizada	Proyecto de investigación	

Tabla 1.1.- EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS ESCUDOS PRESURIZADOS

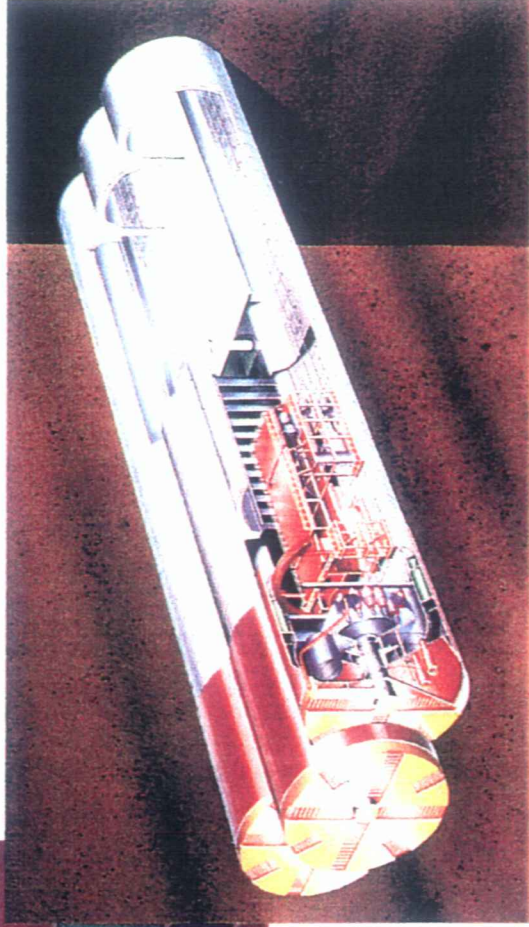
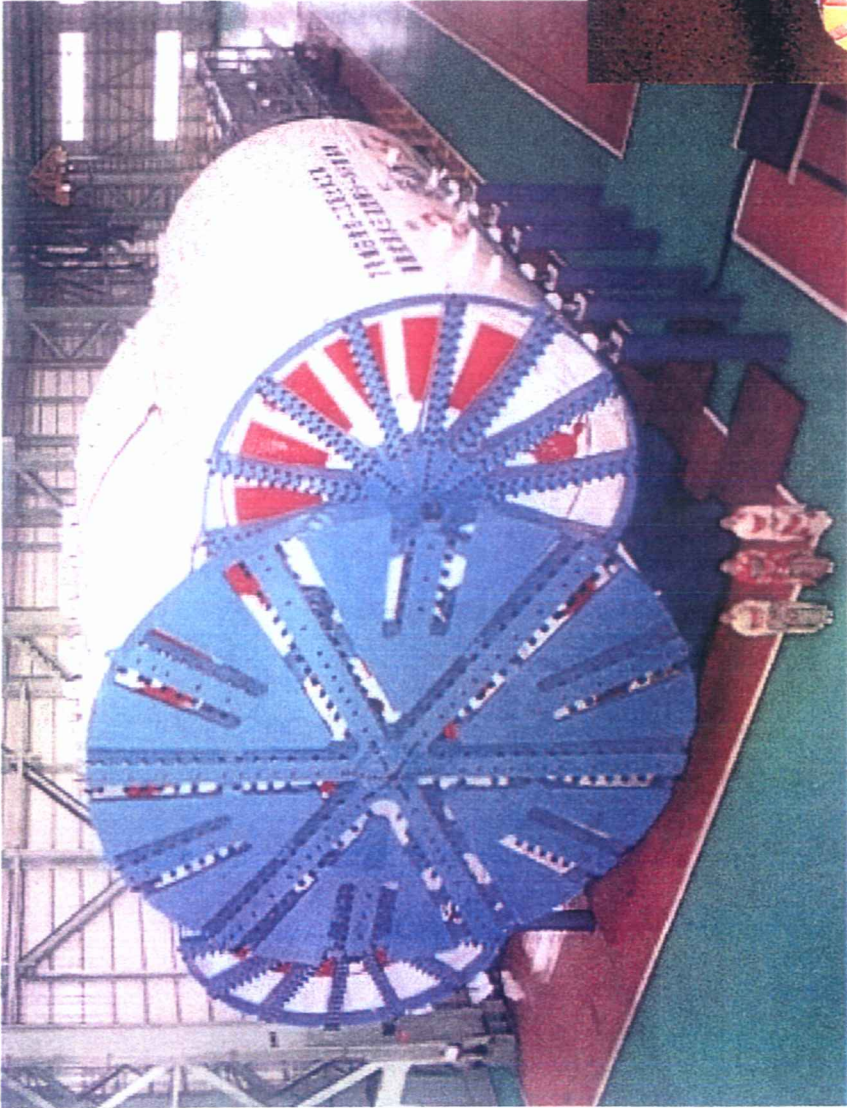


Figura 2

ESCUDO DE CABEZA TRIPLA (\varnothing 9.80 m.)

AÑO	INVENTOR/	TIPO DE MAQUINA	PROYECTO	OBSERVACIONES
1988	IHI	Escudo de lodos articulado diseñado para excavar túneles inclinados y curvos de 5,24 m. de diámetro	Túnel de conducción eléctrica Tokuichi-kansen	Longitud: 2395 m. Inclinación: 15°. Radio mínimo: 20 m.
1989	Herrenknecht AG	Escudo de lodos mixto convertible. Roca/suelo. Diámetro: 11,60 con cabeza retráctil (600 mm.)	Túnel ferroviario de Grauholz, Berna, de 5,5 Km.	
1989	Herrenknecht AG	Escudo mixto de lodos articulado y convertible suelo/roca de 11,60 m. de diámetro	Túnel ferroviario de Grauholz, Berna, de 5 Km.	Innovaciones: -Machaca la roca central. -Cabeza retráctil. Planta de tratamiento primario de la bentonita situada dentro del túnel
1990	Kawasaki	Inicio del desarrollo de escudos de varias cabezas		
1992	Herrenknecht AG	Escudo de lodos mixto convertible. Tierras/lodos. Diámetro: 8,30 con microescudo central independiente de 1,20 m. de diámetro.	Metro de Essen; longitud 2x2,1 Km.	
1992	IHI	Primer escudo de tierras con soporte giratorio de la cabada (rotating shield technology)	Túnel colector bajo el río Kannon en la ciudad de Kawasaki	Terrenos arcillosos
1993	IHI	Diseño y construcción de escudos de tierras. Diseños: NOMST y DPLEX		NOMST. DPLX, para excavar secciones rectangulares u ovals
1994	IHI	Escudo de lodos Método "nesting parent-shield"	Teito Rapid Transit Authority Subway Línea nº 7	Escudo de 14,18 m. y 9,70 m. de diámetro
1994	IHI	Método "Kurun"	Túnel colector Nippa-Sueho de 4435 m. y 9,45 m. de diámetro	Para excavar túneles largos y profundos con fuerte presión hidrostática
1994	IHI	Método "Derun"		Para realizar perforaciones inclinadas o verticales desde un túnel existente
1994	Mitsubishi Heavy Industries	Escudo de lodos de tres cabezas circulares de 17,44 m. x 8,85 m.	Estación de Lidabashi. Línea 12. Metro de Tokio	Presión hidrostática: 5 bar. Arenas y gravas con aguas artesianas. Arcillas
1994	Kawasaki	Escudo de lodos multi-circular de tres cabezas	Estación de Lidabashi en Tokio	Anchura total de excavación: 17,440 m. Altura: 8,84 m.
1995	IHI	Escudo de tierras con inyección de lodos de alto rendimiento; diámetro: 5,81 m.	Túnel hidráulico de Kasunigaura	Rendimiento: 20 m./día, excavación y colocación de dovelas simultáneamente
1995	Kawasaki	Escudo de lodos "parent-shield"	Túnel de cables Takai-Matsubara. Bashi, Tokio	Túnel principal: 7,27 m. de diámetro Túnel secundario: 5,00 m. de diámetro

Tabla 1.3.- EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS ESCUDOS PRESURIZADOS

PROYECTO	LONGITUD	ϕ exc. (m)	ϕ ext. (m)	ϕ int. (m)	TIPO DE ESCUDO	Nº DE ESCUDOS	FABRICANTE	PLAZO	OBSERVACIONES
Metro de Toronto. Canada. Ampliación RTEP. Rapid Transit Expansion Program	2 x 3,2 Km. Túneles paralelos	5,9	5,65	5,2	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	2	LOVAT	10/97-1999	Uso de espumas.
Nuevo túnel ferroviario bajo el río St. Clair, Canada/USA.	1.824 m	9,52	9,15	8,395	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1	LOVAT	11/93-12/94	
Túnel carretero de circunvalación Nishi-Shinjuku, Tokio, Japón	2 x 3 Km. Túneles paralelos	13,23	13	11,9	ESCUDO DE LODOS (SS)	1			
Túneles ferroviarios paralelos bajo el Támesis, Londres	2 x 1,1 km	5,9	5,7	5,2	ESCUDO DE LODOS (SS)	1	KAWASAKI	6/97-6/98	Pendiente 6% atraviesan el Támesis y pasan bajo edificios históricos.
Metro de Valencia, España. Línea 5. Túneles paralelos de vía única	2 x 2,3 km	6,52	6,35		ESCUDO DE TIERRAS +INYECCION ESPUMAS (EPM+FOAM)	1	HERRENKNECHT	11/94-1997	
Túnel de Versailles. Anillo de circunvalación de Paris, de la Autopista A-86. Proyecto SOCATOP.	10 km	11,565	11,26	10,4	ESCUDO CONVERTIBLE TRIMODAL SS/EPB/OPEN	1	HERRENKNECHT	2000	Pendiente 4,5% El escudo se ha diseñado para soportar una presión de 6 bar.
Túneles ferroviarios bitubo de Botlek, Rotterdam, Holanda	2 x 1,835 km	9,75	9,45	8,65	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1	HERRENKNECHT	7/99-2001	Los túneles discurren bajo conducciones de cables y tuberías y pasan bajo el río Oude Maas, bajo el ferrocarril del puerto y bajo una
Túneles ferroviarios en Berlín, Alemania.	4 (795 m + 574)	8,93	-		ESCUDO DE LODOS (SS)	2	HERRENKNECHT		
Túneles carreteros bitubo de Westerschelde, Holanda.	6,5 km	11,33	11	10,1	ESCUDO DE LODOS (SS)	2	HERRENKNECHT	verano del 1999-2001	Pendiente máx. 4,5%
Túnel carretero de Adler, Suiza	-	12,53	-		ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1	HERRENKNECHT		
Túnel colector de Hasting, Inglaterra.	1,6 km	7,36	-		ESCUDO DE LODOS (SS)	1	HERRENKNECHT		
Metro de Izmir, Turquía.	2,7 km	6,5	-		ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1	HERRENKNECHT		
Metro de Londres. Jubilee line extension									
Contrato 105	2x2,8 km	5,2	5	4,5	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	4	KAWASAKI/FCB/D ECON	12/94-7/96	
Contrato 107	2x2,19 km	5,13	5	4,5	ESCUDO MIXTO DE LODOS MIXSCHIELD (SS)	2	HERRENKNECHT	3/95-5/96	
Contrato 110	2x2,5 km	5,2	5	4,5	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	2	LOVAT	8/94-11/95	
Metro de Bangkok, Tailandia. "BlueLine" 1ª Fase	2x10	6,5	6,3	5,7	ESCUDO BIMODAL DE TIERRAS CON INYECCION POSIBLE	6	KA WASAKI	4/1999 - 8/2002	

TABLA 2.1.- PRINCIPALES PROYECTOS DE TÚNELES EXCAVADOS CON ESCUDOS PRESURIZADOS EN LOS ÚLTIMOS AÑOS

PROYECTO	LONGITUD	ϕ exc. (m)	ϕ ext. (m)	ϕ int. (m)	TIPO DE ESCUDO	Nº DE ESCUDOS	FABRICANTE	PLAZO	OBSERVACIONES
Metro de Bangkok, Tailandia. "Blueline" MRTA 2ª Fase	2x10					2	HERRENKNECHT	7/99-6/2001	
Metro de Berlín, Alemania. Prolongación de la Línea 5. Túnel nº 1	2x480 m	6,67	6,45	5,75	ESCUDO MIXTO DE LODOS (MIXSHIELD SS)	1	HERRENKNECHT	3/97-12/98	
Metro de Berlín, Alemania. Prolongación de la Línea 5. Túnel nº 2	2x498 m	6,67	6,45	5,57	ESCUDO MIXTO DE LODOS (MIXSHIELD SS)	1	HERRENKNECHT	3/97-12/98	
Metro de Lille, Francia									
Línea 1bis lote 3	3263 m	7,68		6,8	ESCUDO MIXTO DE LODOS (MIXSHIELD SS)	1	HERRENKNECHT	1996-1998	Se han usado 4 escudos de lodos.
Línea 2, lote 3	3434 m	7,68		6,8	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1	FCB/KAWASAKI	7/94-1996	Se han usado 3 escudos de tierras con inyección de espuma.
Línea 2, lote 2	2099,6 m	7,68	7,5	6,8	ESCUDO DE LODOS (SS)	1	FCB/KAWASAKI	12/94-1996	7% 6,8% pendiente
Línea 2, Lote 1	3735 m	7,68	7,5	6,8	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1	FCB/KAWASAKI	7/94-1996	
Metro de Lyon, Francia									
Línea D subfluvial									
tubo 1 / tubo 2	2X1250	6,5	5,9	5,3	HIDROESCUDO HYDROSHIELD	1	HERRENKNECHT	7/1984-1987	Se excavó un túnel subfluvial bajo los ríos Rodano y Saona con un hidroescudo y bajo edificios. Pendiente máx. 6%. Bloques de granito errático de 1,5m. Hornigón extruído. Presencia sistemática de bloques.
Línea D prolongación									
tubo 1 / tubo 2	2x947	6,27	6	5,3	ESCUDO MIXTO DE LODOS (MIXSHIELD SS)	1	HERRENKNECHT	1993/1994	
Metro automático, Paris, Francia									
Proyecto "Meteor"	4,5 km	8,6			ESCUDO DE LODOS (SS)	1	HDW HOWALDTSWERK E - DEUSTICHE-WERFT	1992-1996	Atraviesa el centro de Paris.
Túnel ferroviario Zurich-Thalwil, Suiza. Proyecto Bahn 2000. Doble vía. Lote 2.01	2,62 km	12,39			ESCUDO CONVERTIBLE BIVALENTE ESCUDO DE LODOS/ TIERRAS (EPB)	1	HERRENKNECHT	6/98-2002 (previsto)	0,95km en suelos trabajando como escudo de lodos. 1,8km en roca molasa trabajando como tuneladora.
Metro de Lisboa, Portugal. Prolongación L-D. Túnel ferroviario de doble vía.	2094 m	9,84	9,52	8,8	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1	HERRENKNECHT	25/3/1996-10/12/1997	
Metro de Shanghai, China. Línea 2. Túnel ferroviario vía simple. Proyecto MRT.		6,34	6,2	5,5	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	10			

TABLA 2.2.- PRINCIPALES PROYECTOS DE TÚNELES EXCAVADOS CON ESCUDOS PRESURIZADOS EN LOS ÚLTIMOS AÑOS

PROYECTO	LONGITUD	φexc. (m)	φext. (m)	φ int. (m)	TIPO DE ESCUDO	Nº DE ESCUDOS	FABRICANTE	PLAZO	OBSERVACIONES
Autopista bajo la bahía de Tokio, Japón.	2x4,6 km	14,14	13,9	12,6 (primer revestimiento)	ESCUDO DE LODOS (SS)	2	KAWASAKI	8/1994-8/1996	
	2x4,8 km	14,14	13,9	11,9 (segundo revestimiento)	ESCUDO DE LODOS (SS)	2	MITSUBISHI	8/1994-8/1996	
Metro de Roma, Italia. Prolongación Línea-A.									
Túnel de vía doble	920 m	10,64	10,3	9,4	HIDROESCUDO (SS)	1	VOEST ALPINE	7/1994-3/1995	
Túnel de vía única	3090 m	6,6	6,4	5,8		1			
Metro automático de Lyon, prolongación Línea-D. Francia. Dos tubos de vía única.									
Tubo 1	904 m	6,27	6	5,3	ESCUDO MIXTO DE LODOS (MIXSHIELD SS)	1	HERRENKNECHT	7/1993-3/95	
Tubo 2	890 m	6,27	6	5,3	ESCUDO MIXTO DE LODOS (MIXSHIELD SS)	1	HERRENKNECHT	7/1993-3/95	
Metro de Sydney. Australia. Túnel ferroviario	5,9 km	10,72	10,42	9,52	ESCUDO CONVERTIBLE TBM/SS	1	HERRENKNECHT	22/12/96-22/05/99	
Túneles del Sifón de Salaam bajo el Canal de Suez, Egipto.	4x650	6,6	6,2	5,7 (primer revestimiento)	ESCUDO MIXTO DE LODOS (MIXSHIELD SS)	1	HERRENKNECHT	29/6/95-28/5/97	
				5,1 (segundo revestimiento)					
Túnel emisorio submarino bajo la bahía de San Diego, California, EEUU.	5,63km+accesos	3,9	3,86	3,4	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1	MITSUBISHI-BORETEC	2/97-3/98	Acondicionamiento del terreno.
Túneles ferroviarios submarinos Store-Baelt o Great Belt, Dinamarca.	2x7,4 km	8,75	8,5	7,7	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	4	HOWDEN / MES / WIRTH	11/90-4/99	
Pasante ferroviario de Milán, Italia, de vía única									
Tubo 1	2054 m	8,03	7,5	6,9	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)		NFM/MITSUBISHI	3/9/92-7/9/93	
Tubo 2	1950 m	8,03	7,5	6,9	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)		NFM/MITSUBISHI	26/1/94-11/9/94	
Metro de Madrid, España. Ampliación									
T-1. Línea 10: Lago-Príncipe Pio. Túnel de vía única.	1.640 m	7,40 - 6,50		6,50 - 5,80	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	6	LOVAT	10/01/1996; 10/09/1996	
T-2. Línea 8: Mar de Cristal - Campo de las Naciones.	2.108 m	7,40 - 6,50		6,50 - 5,80	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	6	LOVAT	24/07/1997; 03/12/1997	
T-3. Línea 4: Esperanza - Parque de Santa María	3.608 m	9,4		8,43	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	6	MITSUBISHI	26/05/1997, 09/05/1998	
T-4. Línea 8: Barajas - Aeropuerto.	1.442 m	9,4		8,43	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	6	MITSUBISHI	13/10/1998; 10/02/1999	

TABLA 2.3.- PRINCIPALES PROYECTOS DE TÚNELES EXCAVADOS CON ESCUDOS PRESURIZADOS EN LOS ÚLTIMOS AÑOS

PROYECTO	LONGITUD	ϕ exc. (m)	ϕ ext. (m)	ϕ int. (m)	TIPO DE ESCUDO	Nº DE ESCUDOS	FABRICANTE	PLAZO	OBSERVACIONES
T-5. Línea 8: Feriales - Mar de Cristal.	1.958 m	6,5		6,50 - 5,80	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	6	HERRENKNECHT	25/08/1997; 10/03/1998	
T-6. Línea 9: Polígono Industrial Vicalvaro - Pavones.	3.356 m	9,4		8,43	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	6	HERRENKNECHT	24/06/1997; 13/08/1998	
T-7. Línea 7: Arroyo Fresno - Valdezarza.	3.234 m	9,4		8,43	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	6	MITSUBISHI	26/04/1997; 09/03/1998	
T-8. Línea 8: Feriales - Aeropuerto.	4.424 m	9,4		8,43	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	6	MITSUBISHI	16/07/1998; 26/02/1999	
T-9. Línea 7: Valdezarza - Islas Filipinas.	3.468 m	9,4		8,43	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	6	HERRENKNECHT	30/08/1997; 16/09/1998	
Túnel ferroviario de Granholz, Bema, Suiza.	6,3 Km	11,6	11,4	10,6	ESCUDO MIXTO CONVERTIBLE (MIXSHIELD TBM/SS)	1	WAYSS & FREYTAG	1/90-5/93	
4º Túnel carretero del Elba, Hamburgo, Alemania.	2,6 km	14,2	13,75	12,35	ESCUDO MIXTO DE LODOS (MIXSHIELD SS)	1	HERRENKNECHT	27/11/97- 3/2000	Pendiente máxima 3,7%.
Metro de Copenhague, Dinamarca.	2x7,5 km	5,71	5,45	4,9	ESCUDO DE TIERRAS BIMODAL (EPB, open/close)	2	NFM/MITSUBISHI		
Túnel ferroviario bajo el Canal de la Mancha (lado Francés).									
T-1 Submarino	15,618 km	5,77	5,44	4,8	ESCUDO DE TIERRAS (permite inyección de lodo)	1	ROBBINS / KAWASAKI	Marzo 1998/ Octubre 1990	
T-2 Submarino	20,009 km	8,78	8,4	7,6	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1	ROBBINS / KAWASAKI	Diciembre 1989/ Mayo 1991	
T-3 Submarino	18,860 km	8,72	8,4	7,6	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1	ROBBINS / KAWASAKI	Abril 1989/ Junio 1991	
T-4 Terrestre	3,162 km	5,61	5,44	4,8	ESCUDO DE TIERRAS (permite inyección de lodos de alta densidad) (EPB)	1	MITSUBISHI/ MARUBENI	Julio 1988/ Mayo 1989	
T-5 Terrestre	3,265 km	8,64	8,4	7,6	ESCUDO DE TIERRAS (permite inyección de lodos de alta densidad) (EPB)	1	MITSUBISHI/ MARUBENI	2/89 - 18/12/89	
T-6 Terrestre	3,265 km	8,64	8,4	7,6	ESCUDO DE TIERRAS (permite inyección de lodos de alta densidad) (EPB)	1	MITSUBISHI/ MARUBENI	3/90 - 12/90	
Túnel carretero de Caluire, Lyon, Francia.	2x3,25 km	11,02	10,7	9,82	ESCUDO DE TIERRAS CONVERTIBLE BIMODAL; TBM/EPB	1	NFM / MITSUBISHI / BORETEC	1/1994 - 18/10/1996 (Tubo norte) 17/03/1997 - 26/05/1998 (Tubo sur)	Bulevar periférico norte atraviesa el centro de la ciudad. Entrada al frente en régimen hiperbárico, sellado automático del frente antes de aplicar aire comprimido.

TABLA 2.4.- PRINCIPALES PROYECTOS DE TÚNELES EXCAVADOS CON ESCUDOS PRESURIZADOS EN LOS ÚLTIMOS AÑOS

PROYECTO	LONGITUD	φexc. (m)	φext. (m)	φ int. (m)	TIPO DE ESCUDO	Nº DE ESCUDOS	FABRICANTE	PLAZO	OBSERVACIONES
Metro de El Cairo, Egipto. Línea 2. Fase 1 doble vía	5,83 km	9,45	9,15	8,35	ESCUDO DE LODOS (SS)	2	HERRENKNECHT	6/7/94-21/5/96	
Túnel colector de Shanghai, China.									
Túnel 1	1422 m			4,2	ESCUDO NO PRESURIZADO + AIRE COMPRIMIDO	1	FCB/KAWASAKI	8/93-10/94	Problemas constructivos; el túnel 1º se inundó de agua y arena; royura de la máquina; presencia de gas metano.
Túnel 2	1254 m							11/91 se abandonó-2/95 se reinició-10/96 (terminado).	
Túnel colector de Glatt, Zurich, Suiza.	5,05 km (2,9 km en molasas; 2,15	5,34	5,04	4,5	ESCUDO CONVERTIBLE TRIMODAL	1	HERRENKNECHT	3/96-6/98	
2º Túnel Heineenoord en Rotterdam, Holanda. Autopista A-29	2x946 m	8,5	8,3	7,6	ESCUDO DE LODOS (MIXSHIELD SS)	1	HERRENKNECHT	2/97-99	
Túnel colector Sevres-Acheres bajo el Sena, Paris.									
Lote 4 y 5	3312 m	4,84	4,64	4	ESCUDO DE TIERRAS	1	LOVAT	8/1988 - 21/06/1990	
Lote 3	3550 m	4,05	3,75	3,25	ESCUDO DE LODOS	1	HERRENKNECHT	10/1989 - 7/1991	
Metro de Singapore. Túneles ferroviarios de la línea Norte-Este del MRT. Mass Rapid Transit.	2X20 KM (TOTAL)								
Contrato C703		6,44		6,1	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	2	MITSUBISHI	1989 - 1999	
Contrato C704		6,526		6,1	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	2	LOVAT	1989 - 1999	
Contrato C705		6,44		6,1	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	2	HITACHI/ZOSEN	1989 - 1999	
Contrato C706		6,55		6,1	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	2	HERRENKNECHT	1989 - 1999	
Contrato C708		6,48		6,1	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	2	HITACHI/ZOSEN	1989 - 1999	
Contrato C710		6,6		6,1	ESCUDO DE TIERRAS DUAL abieto/cerrado (EPB)	2	ICHIKAWA JIMA-HARINA HEAVY IND.	1989 - 1999	
Túnel de servicio de Nagoya, Japón.	1609 m	3,83	3,7	3,45	ESCUDO DE TIERRAS (EPB) con inyección de lodos.	1		4/94-5/95	Túnel bajo la autopista 41 discurre a través de 25 pilares de la autopista a una distancia de 650mm.
2º Túnel carretero subfluvial en Sanghai, China.	2270,5 m	11,22	11	9,9	ESCUDO DE LODOS (SS)	1	MITSUBISHI	1/96-11/96	Bajo el río Huangpu en un tramo de 500m.

TABLA 2.5.- PRINCIPALES PROYECTOS DE TÚNELES EXCAVADOS CON ESCUDOS PRESURIZADOS EN LOS ÚLTIMOS AÑOS

PROYECTO	LONGITUD	$\phi_{exc.}$ (m)	$\phi_{ext.}$ (m)	$\phi_{int.}$ (m)	TIPO DE ESCUDO	Nº DE ESCUDOS	FABRICANTE	PLAZO	OBSERVACIONES
Túnel colector de El Cairo, Egipto.	4,0 km			5	ESCUDO DE LODOS (SS)	1	BADE&THEELEN/NEI	1985-1988	Doble revestimiento.
Contrato 3	1,2 km			1,2-2,8	ESCUDO DE AIRE COMPRIMIDO	1	DECON		
Contrato 12/5A	3,3 km	3,34	3,24	2,87	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	2	LOVAT	verano 1990- final1990	Doble revestimiento el interior de ladrillos resistente a aguas ácidas.
	3,3 km	2,65	2,55	2,2					
Contrato 12	3,3 km			4	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1	OKUMURA/ MARKHAMS	1986-junio 1989	
	0,8 km			1,2	ESCUDO SEMIMECANIZADO CON AIRE	1	JAMES-HOWDEN		
Túneles de drenaje ciudad de Mexico.	5,3 km	4	3,85	3,5	ESCUDO DE LODOS (SS)	2		1984-1986	
		6,24	6,1	5,6	ESCUDO DE LODOS (SS)		OKUMURA-SOLUM/ICA	1987-1992	
Túnel colector de Naniwa, en Osaka, Japón.	8,5 km	7,75		6,5	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1			Utilización de espuma. El colector puso un túnel de metro.
Túneles ferroviarios bajo el río Yodogawa, Osaka, Japón. Línea JR Tozai	2x2325 m	7,15	7		ESCUDO DE LODOS (SS)	1		1997-1999	Dos túneles paralelos junto a otro túnel de servicio bajo el río y bajo los cimientos de pilotes de un puente.
Pasillo verde ferroviario Madrid, España.									
Vía 1	1100 m	7,38		e=25cm	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1	LOVAT		Pasa bajo edificios (Ronda de Segovia). Pasa bajo otro túnel a 1,5 m de distancia.
Vía 2	900 m	7,38		e=25cm					
Tren urbano, bajo el río Piedras, San Juan de Puerto Rico. Dos tubos		6,47			ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1	LOVAT	1999	Bajo edificios zona sísmica.
MRT Chungho line CC 560, Taiwan	6,44 km	6,25	6,1	5,6	ESCUDO DE TIERRAS (EPB+FOAM)	3	HERRENKNECHT		
Túneles paralelos de Metro Nonami, en Nagoga, Japón	2x541,35 m	10,48	10,3	8,8	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1		28/2/92-7/93	Bajo una calle importante y bajo el río Tempaka (100m). Doble revestimiento.
Metro de Berlín, Alemania, 2 tubos	1077	6,6	6,4	5,7	ESCUDO DE LODOS HIDROESCUDO, REDISEÑADO	1	VOES-ALPINE	28/9/88- 10/89	Paso bajo edificios.
Túneles paralelos carreteros de circunvalación de Lion, Francia	2x3,22 km	11,4	10,52	9,82	ESCUDO DE TIERRAS (EPB)	1	MITSUBISHI/NFM	95/97	Pasa bajo el Saona.
Túneles ferroviarios del proyecto MRT Singapur	2x20 km	6,1			ESCUDOS DE TIERRAS (EPB)	25	Diversos fabricantes	89/99	
					ESCUDO DE LODOS (SS)	2			

TABLA 2.6.- PRINCIPALES PROYECTOS DE TÚNELES EXCAVADOS CON ESCUDOS PRESURIZADOS EN LOS ÚLTIMOS AÑOS

PROYECTO	LONGITUD	$\phi_{exc.}$ (m)	$\phi_{ext.}$ (m)	$\phi_{int.}$ (m)	TIPO DE ESCUDO	Nº DE ESCUDOS	FABRICANTE	PLAZO	OBSERVACIONES
2º Túnel en la carretera Yan'an East en Shanghai, China	2,27 km	11,22			ESCUDO DE LODOS (SS)	1	MITSUBISHI	nov-96	Bajo el río Huangpu en una longitud de 500 m.
Metro de Copenhague, Dinamarca.	2x7,5 km			4,9	ESCUDO TIERRAS (EPB)	2	NFM	mar-98	

TABLA 2.7.- PRINCIPALES PROYECTOS DE TÚNELES EXCAVADOS CON ESCUDOS PRESURIZADOS EN LOS ÚLTIMOS AÑOS

AÑO	INVENTOR/ FABRICANTE	ELEMENTO	OBSERVACIONES
1864	P.W. Barlow	Propone por primera vez rellenar el espacio anular entre el revestimiento y el terreno	
1869-1870	J.H. Greathead	Inventa el diafragma transversal, la esclusa y el erector de dovelas	
1896	H.H. Dalrymple-Hay	Utiliza por primera vez arcilla para estabilizar el frente	Idea precursora del diseño de los escudos de tierras
1973	Tekken Kensetu. Const. Comp. Ltd. y Mitsubishi	Sistema automático de control en los escudos de lodos	
1975	Mitsubishi	Incorporación de un tromel a un escudo de lodos de 3,55 m. de diámetro	Para excavar un túnel hidráulico en gravas en el área metropolitana de Tokio
1976		Inyección de lodos en escudos de tierras	Fase experimental
1979	Mitsubishi	Machacadora incorporada a un escudo de lodos	Excavación de gravas y terrenos con zonas petreas
1980	Mitsubishi	Utilización de discos de corte en escudos de lodos	Para terrenos heterogéneos con tramos rocosos o con fragmentos de roca y/o cantos rodados
1980	Kawasaki	Accionamiento eléctrico en un escudo de lodos	
1980	Kawasaki	Cabeza de escudo de lodos con soporte intermedio	Incrementa la robusted de la cabeza y permite mayores diámetros
1981	Kawasaki	Alimentador de tornillo en un escudo de tierras "rotary feeder"	
1981	Kawasaki	sistema de sellado tipo 150 del cojinete central de la cabeza de un escudo	Estanqueidad asegurada hasta una presión de 10 bar.
1981	IHI	Escudo de tierras con inyección de lodos	Efecto lubricante. Efecto acondicionador del suelo con aumento de la impermeabilidad
1982	Kawasaki	Machacadora giratoria de doble cuerpo	Instalada en un escudo de lodos trabajando en gravas para excavar en curva
1982	Kawasaki	Cortadores "copy cutter"	
1983	Kawasaki	Cortadores "over cutter"	
1984	Mitsubishi	Uso de lodos densos en escudos de tierras	Extensión del campo de utilización de los escudos de tierras
1984		Escudo de tierras con inyección de espuma	Fase experimental
1984	Kawasaki	Alimentador de tornillo tipo "ribbon" con descarga giratoria	Para utilización en gravas gruesas
1985	IHI	Sistema automático de erección de dovelas	

Tabla 3.1.- REFERENCIA HISTÓRICA DE LA INCORPORACIÓN DE TÉCNICAS IMPORTANTES EN EL DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LOS ESCUDOS PRESURIZADOS

AÑO	INVENTOR/ FABRICANTE	ELEMENTO	OBSERVACIONES
1985	Kawasaki	Accionamiento eléctrico en escudos de tierras	
1986	Kawasaki	Escudo de tierras articulado	
1986	Kawasaki	Sistema automático de control en los escudos de tierras	
1986	Kawasaki	Diseño de cabezas en forma de domo	Para excavar en zona de gravas
1987		Uso de polímeros en los escudos de tierras	Fase experimental
1990		Uso de espumas en los escudos de tierra	Efecto lubricante. Efecto acondicionador del suelo aumentando su impermeabilidad
1990	Mitsubishi	Técnica de ensamblado de escudos que avanzan en sentido contrario "docking movable hood"	Utilizado cuando un túnel se acomete con dos escudos avanzando simultáneamente por las dos bocas externas
1993	Nishitake et al		
1994	Reda	Uso de polimeros y acondicionadores	Extensión del campo de utilización de los escudos de tierras
1995	Ishimoto et Al.		

Tabla 3.2.- REFERENCIA HISTÓRICA DE LA INCORPORACIÓN DE TÉCNICAS IMPORTANTES EN EL DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LOS ESCUDOS PRESURIZADOS

