Third International Workshop on Concrete Block Paving, Cartagena de Indias, Colombia, May 10-13, 1998
Tercer Taller Internacional de Pavimentación con Adoquines de Concreto, Cartagena de Indias, Colombia, Mayo 10-13, 1998

EXPERIENCES OF A DECADE OF CONCRETE BLOCK PAVEMENTS IN THE PORT OF HELSINGBORG, SWEDEN [1] [2]

Goran HAMMARSKJÖLD
Technical Manager
PORT OF HELSINGBORG
Helsingborg, Sweden

SUMMARY

The Port of Helsingborg is the second biggest port of Sweden. It is a multipurpose port located in the southern part of the country and has an annual turnover of about 10 million t.

The container terminal, inaugurated in 1985, has a concrete block paved - CBP area of 100 000 m^2. It was the first terminal area of this type and size in the country. The original paving structure on top of the reclaimed sand consists of:

100 mm - concrete block paving.
30 mm - sand.
300 mm - granular layer.

The heavy FLT-operation in the container terminal has caused severe settlements, which are very disturbing for the truck drivers, the basic reason being the too weak design of the substructure.

After the first period of operation it was noticed that lines of cracks had developed in the concrete blocks in the traffic lane areas. After investigations it was found that the age of the concrete blocks was an essential factor.

Open drainage ducts do not withstand the wheel load of the heavy FLTs.

The terminal area is built up of shaped concrete blocks. It is very difficult to pick up these blocks and put them properly back again in a modification project.

It has turned out not to be feasible to clean old blocks from sand grains attached to their sides.

The Port of Helsingborg CBP policy is formulated:

1. Concrete blocks are placed 6 months after production, as Swedish standard has been concrete blocks of quality K60 (60 MPa after 28 d).
2. Storm water drainage is taken care of by service falls and traditional gullies.
3. The blocks will in the future be bought of rectangular type.
4. A grid system of empty pipes in the ground to enable future modifications (alternatively heavy traffic lanes of asphalt paving construction).
5. Old blocks can not be used in a new major paving project.

A major refurbishment program must be undertaken of the existing CBP. A comprehensive analysis combined with full scale tests have been performed to study a new design for the paving. Hereby technical, economical and environmental aspects have been thoroughly investigated with special consideration to the possibility to re-use existing material within a recycling philosophy.

Traditional production methods of replacing the existing paving with new materials to form a new CBP turned out to be too expensive. Hereby the philosophy of recycling was introduced. The new CBP will have a subbase where the different layers consist of a mixture of the existing materials and, when possible, mixed in-situ. The old concrete blocks will be reused, after crushing, in the lean concrete as the coarse aggregate. On top a layer of new concrete blocks will be placed. A cost reduction of the CBP of 25 % will be obtained in relation to an entirely new paving.

1. BACKGROUND

Helsingborg is located in the south part of Sweden where the strait of Öresund has its narrowest section. The distance to Helsingör on the Danish side is about 3 n.m. From old paintings and copper plates of the city of Helsingborg a simple landing stage can be seen originating from many centuries. The first real port in Helsingborg was built in 1832 when two breakwaters were constructed. A smaller part of these structures can still be seen. The ferry connection between Helsingborg and Helsingör, Denmark, is the busiest ferry traffic in the world between two ports. Ferry traffic between the two ports has a much longer history than the port itself.

The Port of Helsingborg has developed to be the second biggest port of Sweden. It is a multipurpose port which has an annual turnover of about 10 million t.

The container port, the West Harbor, with a terminal area of 100 000 m^2 was inaugurated in 1985 by His Majesty King Karl XVI Gustav on a sunny May day. It was the first terminal area of this magnitude in the country with a CBP.

The container terminal has been in operation for more than a decade and a great deal of experiences have been obtained from CBP. They are summarised in this paper which also describes a planned refurbishment program.

1 The editors used the International System of Units (SI) in this book of Proceedings, and the comma "," as the Decimal Marker. Each paper is presented first in English and then in Spanish, with the Tables and Figures, in both languages, placed in between.
2 This is the original version of this paper.

In 1991 a new terminal of 50 000 m^2 for the vehicle ferry operation to Helsingör was inaugurated. This terminal was also built as a CBP design.

2. THE CONTAINER TERMINAL OPERATION SYSTEM

The West Harbour was originally intended to be a pure ro-ro terminal. However during the course of the project it was realised that lo-lo operations would also be a part of the future operation. Therefore crane tracks, removal of a gantry crane from another port terminal and the purchase of a new Gottwald mobile crane were included in the project.

To-day the major part of the container handling, consisting of about 60 000 TEUs per year, is done as a lo-lo operation. The horizontal transportation within the terminal is done by FLT implying an axis load on the pavement of more than 850 kN. Terminal tractors and trailers are used for transportation between the different terminals of the port.

3. ORIGINAL DESIGN OF CBP IN THE CONTAINER TERMINAL

The port was built up of reclaimed sand dredged from the strait of Öresund. All quays were of sheet piling design. The fill was compacted by a relevant number of overpasses with a 13 t vibrating roller making more than 6 overpasses. No depth compaction was undertaken.

The paving was decided to be of CBP type mainly based on a study tour to the ECT Terminal in Rotterdam. The manufacturers of Sweden could only deliver 100 mm concrete blocks at that time. The CBP was designed for fully loaded FLT but no life-cost evaluation was undertaken.

The substructure on top of the reclaimed sand was, mainly due to economical reasons, given a limited design of 300 mm of granular layer with 30 mm of sand as a bed for the concrete blocks.

The concrete blocks were of both Uni-coloc and SF-block types with a concrete strength of K60 (60 MPa after 28 d). The use two different types was based on limitations in production capacity at the two factories.

4. EXPERIENCES OF THE CBP AFTER A DECADE OF OPERATION IN THE CONTAINER TERMINAL

The truck drivers complained to the Workers Safety Committee about an unacceptable working situation due to the severe settlements in the pavement. A study was undertaken by the State Workers Health Organisation to investigate the situation in the truck cabin during a full shift of operation in the driving chair of an FLT. The report from this investigation indicated that the working conditions were not suitable.

Others problems have also been identified of more technical character as cracks in the CBP, degradation of the open drainage ducts and difficulties to undertake modifications in the paving.

4.1 SETTLEMENTS

Severe settlements have developed throughout the years (Figure 1). These settlements have been of two types:

1. General settlement in the reclaimed sand fill.
2. Settlements due to the terminal operation.

The general settlement in the reclaimed sand fill has developed unevenly over the entire terminal area and has nothing to do with the CBP. Of course differences in fill thickness have implied differences in settlements. Even more important seems to be differences in the fill material related to the positioning of the outlet point from the sand pumping system. As this point was moved to a very limited number of positions during the reclamation works a systematic separation of the fill material has been obtained over the terminal area. This has most likely given the greatest contribution to the variations in the settlements in the sand fill.

As previously mentioned no depth compaction was undertaken of the reclaimed area except with a 13 t vibrating roller. We estimate that the settlements in the sand fill are fully developed to-day.

The settlement due to the terminal operation has caused more difficult settlements due to their local character. The terminal operations pattern of the FLTs is easily identified if one studies the settlements in the paving. Frequently used driving lanes and braking areas in front of truck loading points and container stacks have given the CBP severe damages. These damages are not a function of the concrete blocks themselves but are caused by a too weak design of the substructure under the blocks.

The settlements in the container terminal are of such a magnitude that a refurbishment program must be undertaken.

4.2 CRACKS

After the first period of operation in the autumn of 1985, long cracks were observed in the paving (Figure 2). They could be identified to be caused by the wheels of the terminal trailers which have massive rubber tyres. These tyres are occasionally torn off mainly during curve driving. It could however not be 100 % proved that the naked steel wheel was the only reason as these cracks occurred only sporadically. The breaking of the blocks were observed were the scratching wheel passed over "unfavourable" parts of the concrete blocks as corners and "waist".

Two possible reasons were discussed:

1. The concrete of the blocks was not of adequate quality.
2. Traffic had been allowed on the CBP before the concrete had obtained relevant strength.

In order to investigate the first mentioned issue undamaged blocks were taken out of the CBP and brought to an official concrete laboratory in the end of October 1985. At that time the blocks had an age of more than 6 months. Tests were undertaken giving a compression strength of more than 75 MPa. It was concluded that concrete blocks of Swedish standard quality did not give sufficient strength after 28 d. After six months no problem was identified to this respect. The extra cost for having blocks of K75 quality could not be motivated.

In order to further investigate the importance of the age of the concrete blocks, new cracks were painted every months with new colours, starting from late summer 1985. Hereby, it was observed that new cracks did not develop after a few months. Apparently the concrete of the individual block must have developed to an adequate concrete strength.

As a consequence, we to-day have a Port of Helsingborg CBP policy that concrete blocks of Swedish standard are bought and manufactured six months before laying. By experience we know that the operations department will not allow us to have a paved area laying idle awaiting the build-up of the concrete strength.

4.3 STORM WATER DRAINAGE

Storm water drainage was built of the open drainage type with corner steel bar reinforcement at the opening. It has been found that this type of ducts can not withstand the load of the truck wheels in the container terminal (Figure 3).

As a Port of Helsingborg CBP policy, storm water drainage is handled the traditional way of giving the top surface relevant service falls towards ordinary gullies in terminal areas where the traffic can not be restricted to certain traffic lanes forever.

4.4 MODIFICATIONS

The Operations Department has during the past decade, from time to time, brought up requests for modifications in the container terminal due to changes in the traffic. In a lot of these cases it has been necessary to undertake works in the CBP.

It is almost impossible to obtain a good connection to neighbour non-rebuilt areas of the CBP (Figure 4). The irregular shape of the Uni-coloc and SF-blocks makes it impossible to get a good connection. The restoring after, e.g. placing a new electrical cable, implies a bump in the paving which is very disturbing for the truck drivers.

At the first major modification projects in the container terminal, we tried to reuse the old blocks. It appeared however, that the individual sand grains, from the sand fill in the CBP joints, were so firmly attached to the blocks that the blocks could not be placed at the proper distance. Hard water jet flushing of the individual concrete blocks was not sufficient to get rid of the sand grains to the required extent. Therefore it turned out to be cheaper to buy new blocks which of course was very popular among the concrete block suppliers.

As a Port of Helsingborg CBP policy, new major terminal projects are provided with a grid system of empty pipes in the subbase where additional cables can be placed at a later stage. Despite the extra cost during the implementation stage of the project, our experience is that we have avoided many bumps.

The use of rectangular shaped blocks could be a further step to make it easier to connect to adjacent areas. However, the experience of this is very limited in our port. According to studies undertaken, the bearing capacity of this type of CBP corresponds to that of a shaped block design.

Another alternative is to have the main traffic lanes of the terminal designed with an asphalt paving. We have seen this solution at the Roland Umslag terminal in Bremen, Germany, and in the container terminal in the Port of Lisbon, Portugal, where it appears to be a good solution. Service facilities can then be placed in these areas and the CBP need not to be touched in connection with any modification works. The disadvantage is the loss of flexibility of the terminal layout.

5. CBP IN THE H-H FERRY TERMINAL

The new vehicle ferry terminal for the Helsingborg - Helsingör (H-H) ferry connection has an area of about 50 000 m^2. It was inaugurated in November 1991 and was given a CBP to a great extent, due to our experiences from the container terminal. The lighter colour of the concrete block surface was regarded to be an extra bonus to obtain better light conditions for the night traffic in the terminal.

The CBP was built, on top of the filled sand, of 250 mm bearing coarse, 40 mm sand and 80 mm shaped concrete blocks in straight forward driving areas. In curves the subbase was strengthened by using 80 mm of bearing coarse and 120 mm of lean concrete (130 kg of cement / m^3). Rectangular blocks could not be obtained from the suppliers.

In this project we have followed our CBP policies:

1. Six months pre-production of the blocks before laying and opening for traffic.
2. Gullies were used for the storm water drainage system; rain water ducts of open drainage duct type were only placed where the traffic flow will not destroy the ducts in the future.
3. A grid system of empty pipes was placed in the fill allowing us to make additional installations in the terminal in the future, without having to lift the CBP.

In the ferry terminal project, depth compaction was undertaken by means of a vibrating rod, developing an immediate settlement of about 0,4 m to 0,5 m at a fill height of 8 m. We have thereafter not had any settlements in the fill during the first 6 years of operation.

No bumps have been developed in the terminal due to later modifications which we feel is to the satisfaction of the drivers. In this new ferry terminal about 2 million vehicles pass every year.

6. ALTERNATIVE CBP REFURBISHMENT DESIGNS FOR THE CONTAINER TERMINAL

As mentioned above a refurbishment project has to be undertaken in the paving of the container terminal due to the severe settlements. Various methods have been studied and tested.

Fall-weight tests were undertaken by the Swedish Road and Transportation Institute in order to have relevant values of the Dynamic Elasticity Modules (E-dyn) of the existing sand fill and the CBP. The following values were obtained:

Thickness	Layer	E-dyn modules (MPa)
130 mm	Concrete blocks and sand	1 500 - 2 000
300 mm	Bearing course (base)	250
3,6 m	Sand fill (subgrade)	120 - 150

The design parameters for the dynamic load of the terminal traffic are shown in Table 1.

It should be noted that front axle weight of 95,7 t is related to a fully loaded 12 m (40 feet) container. In order to reflect the actual situation in the terminal an axle weight of 74,4 t has been used in the calculations.

The number of FLT movements (loaded) has been estimated to 200 000 during a 20 years project life time. The static load from stacked containers was also considered.

The Dutch consultant company of Heidimij Advies was contracted to make the calculations of discussed paving designs. Laboratory tests were undertaken by the Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI) and field test were done by the contracting company of NCC.

The dimensioning of the surface construction was done by using a linear elastic multi-layer model. The model represents the surfacing construction as a multi-layer system in which materials are characterised by their elastic modules (E) and the transverse contraction coefficient (μ). The materials are assumed to be homogenous and isotropic, while the layers extend infinitely in the horizontal plane.

6.1 CBP-BASED DESIGN

Various designs of the surface construction were studied. The design work covered two different basic alternatives:

1. Maintained service level.
2. Not maintaining the service level i.e. building an additional structure on top of the existing CBP whereby only the subbase of the existing structure was included as a part of the new substructure.

The initial calculations of Alternative 2 showed a required elevation of the surface levels of about 600 mm. This alternative was later omitted due to problems with connections to existing structures e.g., quays, warehouses.

One of the alternatives which was further elaborated:

100 mm - concrete blocks.
40 mm - granular course.
450 mm - lean concrete.
150 mm - gravel.

The lean concrete consists of coarse aggregate, sand, cement and water, in such portions that the 7 d cube test is, at least, 3 MPa.

6.2 ASPHALT-BASED DESIGN

In order to compare with an asphalt-based alternative parallel calculations were done for each CBP-alternative. For the above shown construction the corresponding asphalt alternative was:

200 mm - high stability asphalt.
450 mm - lean concrete.
100 mm - gravel.

6.3 EVALUATION OF ALTERNATIVES STUDIED

From the technical point of view (suitability, experience and maintenance) the CBP alternative was proposed by the Consultant to be the most favourable.

A cost estimate of the two alternatives gave the following unite-cost[3]:

CBP-based design	596 SEK/m^2
Asphalt-based design	761 SEK/m^2

Taking into consideration a minimum required area of refurbishment of 30 000 m^2, a total cost of 18 million SEK (2,25 million US$) was calculated for the CBP-alternative excluding costs for consulting, drainage works etc.

Further, it was realised that huge quantities of second hand concrete blocks would be a problem for the port as well as other materials from the old paving not to be used in the new design.

The total project cost was regarded to be too high and therefore alternative solutions had to be found.

7. MODIFIED CBP-BASED DESIGN - RECYCLING

The estimated project cost included a large portion of buying new materials and transportation. The above mentioned aspect of obtaining a large volume of used material after the termination of the project, developed the idea of recycling.

Together with the consultant the following design of the CBP structure was decided

3 1 SEK = Swedish Crown ≈ 0,125 US$.

100 mm - concrete blocks.
40 mm - sand.
200 mm - lean concrete.
500 mm - modified sand-cement stabilisation.

The coarse aggregate of the lean concrete could consists of crushed concrete blocks to be mixed with the gravel from the existing construction. Due to the required reliability of the homogeneity of the lean concrete it was realised that this mixing had to be done at a mixing plant.

The modified sand - cement stabilisation is a mixture of sand and granulate 0 mm to 20 mm in proportions 50/50 and cement to about 6 % to 8 %. The cube test should give an average of 8 MPa after 28 d.

It was realised that this mixture could consist of the sand and gravel from the existing paving construction. However the costs related to digging, transportation to a mixing plant, re-transportation and placing were a significant part of the calculated price. Therefore the idea of in-situ mixing of the Stabilized layer came up. A Swedish contractor presented a suitable equipment, the MIX CUT H16C, which could operate with a layer thickness of 500 mm (Figure 5). By adding cement and water a suitable mixing would be obtained.

The MIX CUT H16C is a converted excavator where the bucket has been replaced by an big cutting-rolling outfit which at the same time excavates the top layer and mixes it with material spread out on its top.

As this in-situ mixing technique was something new to the Port of Helsingborg, it was decided to make full scale tests.

8. TESTS UNDERTAKEN

Two types of tests were undertaken:

1. In-situ mixing of the modified sand - cement stabilisation.
2. Compression tests of:
   - Cubes of the lean concrete based on crushed concrete blocks and gravel from the existing paving.
   - Cylinders from the in-situ mixed modified sand - cement stabilisation.

The in-situ mixing of "modified sand - cement stabilisation" was tested at a separate site. Layers of 230 mm of gravel (0 mm to 50 mm) and 200 mm of sand from the existing paving were laid out separately and were then compacted. After checking of the water content cement was evenly laid out over the entire test area (150 kg per m^3) and the MIX CUT H16C made one mixing passage over the entire surface. Additional water quantities was then poured out over the area to obtain a water content of 6 %. Thereafter a second mixing passage was done.

Concrete cores was drilled out from the slab after 7 d for compaction tests. The test results gave an average of 7,0 MPa.

The lean concrete mixing was done at the CBI laboratory containing the crushed concrete blocks and gravel from the existing paving.

The portions of the different components (in kg/m^3), followed the recommendation of the Dutch consultant:

cement -	150
water -	150
crushed concrete -	1 000
gravel -	1 125

The cost for the "recycling" CBP-design has been calculated to 437 SEK/m^2 giving a total project budget cost of 13,1 million SEK. This means a project cost reduction of more than 25 % in comparison to the traditional solution.

9. SUMMARY OF THE PORT OF HELSINGBORG CBP EXPERIENCES AFTER A DECADE OF OPERATION

The experiences from more than 10 years of CBP paving in the Port of Helsingborg is summarised in the CBP-policy:

1. The subbase must be of sufficient bearing capacity.
2. Blocks must be produced at least 6 months before placing in a project, as Swedish standard has been concrete blocks of quality K60 (60 MPa after 28 d).
3. Storm drainage water is taken care of via traditional service falls to the gullies as the drainage ducts have not withstand the FLT traffic.
4. Concrete blocks will be of rectangular type as it is very difficult to put shaped blocks back again after lifting.
5. A grid system of empty pipes is placed in the ground to enable modifications with a minimum of disturbance to the CBP at major paving projects (alternatively asphalt paving could be used in the main traffic lanes).
6. Old blocks can not be used in large areas of repaving.
7. It is possible to re-use existing materials, including crushed concrete blocks, in a refurbishment project.

VEHICLE *VEHÍCULO*	UNLOADED WEIGHT (KG) *PESO DESCARGADO*	AXLE WEIGHT (KG) / *CARGA POR EJE*			CONTACT PRESSURE (MPA) *PRESIÓN DE CONTACTO*
			LOADED *CARGADO*	UNLOADED *DESCARGADO*	
FLT	57 400	**Front / *Frente***	95 700	30 500	0,98
		Rear / *Atrás*	6 700	26 900	

Table 1. Design parameters.
Tabla 1. *Parámetros de diseño.*



Figure 1. Settlements.
Figura 1. *Asentamientos.*



Figure 2. Cracks.
Figura 2. *Fisuras.*



Figure 3. Open drainage duct.
Figura 3. *Ducto de drenaje abierto.*



Figure 4. Modification.
Figura 4. *Modificaciones.*



Figure 5. The MIX CUT H16C.
Figura 5. *Corteadora MIX CUT H16C.*

EXPERIENCIAS DE UNA DÉCADA DE PAVIMENTACIÓN CON ADOQUINES DE CONCRETO EN EL PUERTO DE HELSINGBORG, SUECIA [4] [5]

Goran HAMMARSKJÖLD
Director Técnico
PUERTO DE HELSINGBORG
Helsingborg, Suecia

RESUMEN

El puerto de Helsingborg es el segundo puerto más grande de Suecia. Es un puerto multifuncional localizado en la parte sur del país y tiene un movimiento anual total de aproximadamente 10 millones de toneladas.

El terminal de contenedores, inaugurado en 1985, tiene un área de 100 000 m^2 en pavimentos de adoquines de concreto. Fue la primera terminal del país de este tipo y tamaño. La estructura del pavimento original colocado sobre la arena recobrada del mar consiste en:

100 mm -	adoquines de concreto.
30 mm -	arena.
300 mm -	capa granular.

La operación pesada de cargadores de carga frontal - FLT en la terminal de contenedores causó un asentamiento severo, debido principalmente a un diseño demasiado débil de la estructura, que es bastante molesto para los conductores de los camiones.

Después del primer período de operación, se detectó que se habían desarrollado líneas de grietas en los adoquines de concreto en las áreas de tránsito. Después de investigaciones se encontró que la edad de los adoquines de concreto constituye un factor importante.

Los ductos abiertos de drenaje no soportan la carga de las ruedas de los FLT pesados.

El área del terminal está construida con adoquines de concreto con forma no rectangular. Es muy difícil retirar estos adoquines y colocarlos de nuevo correctamente en una modificación del proyecto.

Resulta que no es factible limpiarle los granos de arena pegados a los lados a los adoquines.

Se formula la política del puerto de Helsingborg con respecto a los pavimentos de adoquines de concreto:

4 Los editores utilizaron el Sistema Internacional de Unidades (SI) en estas Memorias, y la coma "," como Puntuación Decimal. Cada ponencia se presenta primero en Inglés y luego en Español, con las Tablas y Figuras, en ambos idiomas, colocadas en medio de ellas.

5 Esta es una traducción de la ponencia original escrita en Inglés, realizada por Zoraya Falah y Germán G. Madrid, no sometida a la aprobación del autor.

1. Los adoquines de concreto se colocan 6 meses después de haberse producido. La Norma Sueca requiere adoquines de concreto de calidad K60 (60 MPa a los 28 d).
2. El drenaje de agua lluvia se hace a través de pendientes de servicio y cunetas tradicionales.
3. En el futuro se comprarán adoquines rectangulares.
4. Construcción de una red de tuberías vacías dentro del piso, que hará posible las futuras modificaciones (alternativamente, carriles de tráfico pesado alternos construidos con pavimento en asfalto)
5. Los adoquines viejos no podrán ser utilizados en nuevos proyectos de pavimento.

Se debe llevar a cabo un programa mayor de restauración de los pavimentos de adoquines de concreto existentes. Se han realizado análisis exhaustivos, combinados con pruebas a gran escala, para estudiar un nuevo diseño para el pavimento. Por esto se han investigado a fondo aspectos técnicos, económicos y ambientales con especial consideración acerca de la posibilidad de reutilizar el material existente, con miras al reciclaje.

Los métodos tradicionales de producción, consistentes en reemplazar el material existente con nuevo material para formar pavimentos de adoquines de concreto nuevos resultaron ser muy costosos. Por esto se introduce la filosofía del reciclaje. El nuevo pavimento de adoquines de concreto tendrá una subbase cuyas capas consisten en una mezcla de los materiales existentes y, cuando sea posible, mezclados en el sitio. Los adoquines de concreto viejos se reutilizarán, después de triturados, para elaborar el concreto pobre, cumpliendo la función de agregado grueso. En la parte superior, se coloca una capa de adoquines de concreto nuevos. Se obtendrá una reducción en los costos del pavimento de adoquines de concreto del 25 %, con relación al de un pavimento totalmente nuevo.

1. ANTECEDENTES

La ciudad de Helsingborg está localizada en el sur de Suecia, donde tiene su sección más delgada en el estrecho de Öresund. La distancia a Helsingör en el lado Danés es de aproximadamente 3 millas náuticas. En las pinturas antiguas y en los platos de cobre antiguos de la ciudad de Helsingborg se puede ver un muelle de amarre sencillo, originado hace muchos siglos. El primer puerto real se construyó en Helsingborg en 1832 cuando se construyeron dos diques. Una pequeña parte de esta estructura se puede apreciar aún hoy. El ferry que conecta Helsingborg y Helsingör, Dinamarca, es el ferry con mayor ocupación en el mundo entre dos puertos. El tráfico por ferry entre estos dos puertos, tiene una historia más larga que el mismo puerto.

El puerto de Helsingborg se ha convertido en el segundo más grande de Suecia. Es un puerto multifuncional que tiene un movimiento anual de 10 millones de toneladas.

El puerto de contenedores, el West Harbor, con un área del terminal de 100 000 m^2, lo inauguró, en 1985, su majestad el Rey Carlos Gustavo XVI en un soleado día de mayo. Era la primera terminal de esta magnitud en el país, construida con pavimento de adoquines de concreto.

El terminal de contenedores ha estado en operación por más de una década y se ha obtenido un gran número de experiencias del pavimento de adoquines de concreto, las cuales están resumidas en esta ponencia que también describe un programa de restauración planeado.

En 1991, se inauguró una nueva terminal de 50 000 m^2 para la operación del ferry a Helsingör. Este terminal también se construyó como un diseño en pavimento de adoquines de concreto.

2. EL SISTEMA DE OPERACIÓN DE LA TERMINAL DE CONTENEDORES

Se pensó originalmente que el West Harbour, puerto occidental fuera únicamente un terminal ro-ro puro. Sin embargo se constató que las operaciones de cargue podrían formar parte de una futura operación. De tal manera que se incluyeron en el proyecto, rieles para grúas, la remoción de una grúa corrediza de otra terminal del puerto y la compra de otra grúa móvil nueva tipo Gottwald.

Hoy la mayor parte del manejo de contenedores, consistente en más o menos 60 000 TEUs por año, se efectúa como operación de cargue. El transporte horizontal dentro de la terminal, se hace por FLT lo que implica una carga de ejes sobre el pavimento de más de 850 kN. Se utilizan tractores terminales y remolques para el transporte entre las diferentes terminales del puerto.

3. DISEÑO ORIGINAL DEL PAVIMENTO DE ADOQUINES DE CONCRETO EN LA TERMINAL DE CONTENEDORES

El puerto se construyó de arena dragada del Estrecho de Öresund. Todos los muelles fueron construidos con tablestacados metálicos. El lleno fue compactado por un número importante de pasadas de un rodillo vibratorio de 13 t de peso, con más de 6 pasadas. No se efectúo compactación de profundidad.

Se decidió construir el pavimento de adoquines de concreto, principalmente gracias al viaje realizado al puerto de Rotterdam, a la terminal del ECT. Los productores de Suecia estaban sólo en capacidad de entregar en ese momento adoquines de concreto de 100 mm de espesor. El pavimento de adoquines de concreto se diseñó para FLT de carga pesada, pero no se adelantaron estudios de costo del pavimento en la vida útil del mismo.

Debido principalmente a razones económicas, se dio un diseño limitado de una capa granular de 300 mm con 30 mm de arena como capa de arena

para los adoquines de concreto, colocado todo esto sobare la subrasante de arena dragada. Los adoquines de concreto fueron tanto del tipo Uni-coloc como SF, con una resistencia del concreto de K60 (60 MPa a los 28 d). La utilización de dos tipos diferentes se basó en las limitaciones en la capacidad de producción de las dos fábricas.

4. EXPERIENCIA CON EL PAVIMENTO DE ADOQUINES DE CONCRETO DESPUÉS DE UNA DÉCADA DE OPERACIONES EN LA TERMINAL DE CONTENEDORES

Los conductores de los camiones se quejaban, ante el comité de seguridad de los trabajadores, de una situación inaceptable de trabajo debido a los severos asentamientos en el pavimento de adoquines de concreto. Para analizar la situación, se llevó a cabo una investigación por parte de la Organización Estatal para la Salud de los Trabajadores, durante un turno completo de trabajo, en las cabinas de los camiones y en la silla de conducción de un FLT. El reporte de esta investigación indicó que las condiciones de trabajo no eran las apropiadas.

Se habían identificado otros problemas de carácter más técnico como grietas en el pavimento de adoquines de concreto, degradación de los ductos de drenaje y dificultades para llevar a cabo modificaciones en el pavimento.

4.1 ASENTAMIENTOS

Se habían desarrollado severos asentamientos a través de los años (Figura 1). Estos asentamientos habían sido de dos tipos:

1. Asentamiento general en el lleno con arena bombeada.
2. Asentamientos debidos a la operación del terminal.

El asentamiento general en el lleno con arena bombeada se había desarrollado en forma irregular, a lo largo de todo el área del terminal y no tiene nada que ver con el pavimento de adoquines de concreto. Obviamente las diferencias en el espesor del lleno habían implicado diferencias en los asentamientos. Parecen haber sido mucho más importantes las diferencias en el material de llenado relacionadas con la localización con respecto al punto de salida del bombeado de la arena. Como este punto se movió hacia un número muy limitado de posiciones durante los trabajos de restauración se obtuvo una separación sistemática del material de llenado a lo largo del área del terminal. Esto fue lo que más contribuyó a las variaciones en los asentamientos en el lleno de arena.

Como se mencionó anteriormente, no se llevó a cabo compactación profunda del área recuperada, excepto con un rodillo vibratorio de 13 t. Se cree que ya se ha completado los asentamientos esperados para el lleno de arena.

El asentamiento debido a la operación de la terminal ha causado unos asentamientos más difíciles debidos a su carácter local. El patrón de las operaciones de la terminal del FLT es muy fácil de identificar si se estudian los asentamientos del pavimento. Los carriles de conducción utilizados con mucha frecuencia; las áreas de frenado frente a los puntos de cargue de los camiones y del arrume de los contenedores, han ocasionados daños severos al pavimento de adoquines de concreto. Estos daños no son una función propia de los adoquines de concreto, sino que obedecen a un diseño pobre de la infraestructura de los adoquines.

Los asentamientos en el área de la terminal de contenedores son de tal magnitud que se debe llevar a cabo un programa de restauración.

4.2 GRIETAS

Durante el primer período de operación en el otoño de 1985, se observaron grietas largas en el pavimento (Figura 2). Se pudo determinar que eran causadas por las llantas de los remolques de la terminal que tienen llantas de caucho macizas. Estas llantas se descascaran ocasionalmente, principalmente en las curvas. Sin embargo, no se puede comprobar completamente que la única causa para que esto ocurriera fuera el descubrimiento del acero en las llantas ya que las grietas ocurrían muy esporádicamente. Las grietas de los pavimentos de adoquines se observaban cuando la llanta descascarada pasaba sobre partes desfavorables de los adoquines de concreto como en las esquinas y en las cinturas.

Se discutieron dos razones posibles:

1. El concreto de los adoquines no era de la calidad adecuada.
2. Se autorizó el trafico sobre el pavimento de adoquines de concreto antes de que el concreto fuera lo suficientemente resistente.

Para poder investigar el primer punto se extrajeron adoquines de concreto en buen estado y fueron llevados a un laboratorio de concreto oficial a finales de Octubre de 1985. Para esa época, los adoquines tenían una edad de más de 6 meses. Se elaboraron las pruebas resultando en una resistencia a la compresión de más de 75 MPa. Se concluyó que los adoquines que cumplían la Norma Sueca, no tenían suficiente nivel de resistencia a los 28 días. Después de seis meses no se identificaron problemas de esta índole. No se logró motivar el incurrir en el extra costo que acarreaba tener adoquines de calidad K75.

Con el fin de investigar más a fondo la importancia de la edad de los adoquines de concreto, se pintaban las grietas nuevas cada mes con colores diferentes, a partir de finales del verano de 1985. De ahí se concluyó que no se desarrollaron nuevas grietas después de unos pocos meses. Aparentemente se desarrolló una resistencia adecuada del concreto de cada adoquín.

Como consecuencia se tiene en la actualidad una política de pavimentos de adoquines de concreto

para el puerto de Helsingborg, acerca de la Norma Sueca para los adoquines de concreto, de no instalarse antes de los 6 meses. Por experiencia se sabe que el departamento de operaciones no permitirá tener una área pavimentada pero inutilizada, esperando que aumente la resistencia del concreto.

4.3 DRENAJE DE AGUA LLUVIA

Se construyó drenaje de agua lluvia del tipo de drenaje abierto reforzado con una barra de acero en las esquinas en la apertura. Se ha encontrado que esta clase de ductos no soporta la carga de las llantas de los camiones en la terminal de contenedores (Figura 3).

Como política del pavimento de adoquines de concreto del puerto de Helsingborg, el drenaje de agua lluvia se elabora en la forma tradicional, dándoles a la superficie suficiente caída hacia cunetas corrientes, en las áreas de la terminal donde el tráfico no puede ser restringido a ciertos carriles de tránsito para siempre.

4.4 MODIFICACIONES

El departamento de operaciones ha traído, de vez en cuando, durante la pasada década, peticiones para elaborar modificaciones en la terminal de contenedores debido a los cambios en el tráfico. En muchas de esas ocasiones ha sido necesario realizar trabajos en el pavimento de adoquines de concreto.

Es casi imposible de obtener una buena conexión del pavimento de adoquines de concreto con las áreas vecinas no restauradas (Figura 4). La forma irregular de los adoquines Uni-coloc y SF hacen imposible obtener una buena conexión. La restauración posterior, por ejemplo, la colocación de un cable eléctrico nuevo, implica la aparición de un resalto en el pavimento, que es muy molesto para los conductores de los camiones.

En los primeros proyectos de modificaciones de importancia se trató de reutilizar los adoquines usados. Sin embargo sucedió que los granos de la arena de la junta estaban tan pegados, que los adoquines no se podían colocar a la distancia apropiada. No fue suficiente lavarlos con chorro de agua a presión para sacarle la arena hasta el punto requerido, de tal forma que salió más barato comprar adoquines nuevos, lo cual fue obviamente bien recibido por los proveedores de adoquines de concreto.

Como política del puerto de Helsingborg los principales proyectos nuevos han sido dotados con una red de tuberías vacías en la subbase, para colocar cables posteriormente si se necesitara. A pesar del extra costo ocasionado durante la etapa de construcción del proyecto, la experiencia es que se han evitado muchos resaltos.

La utilización de adoquines de concreto rectangulares podría constituir un paso más avanzado para facilitar la conexión a las áreas adyacentes. Sin embargo la experiencia acerca de ésto es muy limitada en este puerto. De acuerdo con investigaciones hechas, la capacidad de cargue de pavimentos con este tipo de adoquines de concreto es igual a la de pavimentos con adoquines con formas no rectangulares.

Otra alternativa es tener carriles de tráfico principal diseñados con pavimento de asfalto. Se ha visto esta solución en la terminal Umslag en Bremen, Alemania, y en la terminal de contenedores del Puerto de Lisboa, Portugal, donde es aparentemente una buena solución. Se pueden colocar facilidades de servicio en estas áreas y no se requiere tocar el pavimento de adoquines de concreto para cualquier trabajo de modificación. La desventaja es la pérdida de flexibilidad de la disposición física del terminal.

5. LOS PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE CONCRETO EN LA TERMINAL DEL FERRY H-H

La nueva terminal de vehículos del ferry Helsingborg - Helsingör (H-H) tiene un área de aproximadamente 50 000 m^2. Se inauguró en noviembre de 1991, y se utilizaron pavimentos de adoquines de concreto en una gran extensión, debido a la experiencia en la terminal de contenedores. El color más claro de la superficie de los adoquines de concreto, se tomó como una ventaja extra para obtener mejores condiciones de iluminación para el tráfico nocturno en la terminal.

El pavimento de adoquines de concreto se construyó sobre el lleno de arena recuperada, con una rebase de 250 mm, 40 mm de capa de arena y 80 mm de adoquines de concreto no rectangulares, en áreas de tráfico en línea recta. En las curvas la capa de base se fortaleció utilizando una capa de base de 80 mm y 120 mm de concreto pobre (130 kg de cemento/m^3). No se pudieron conseguir adoquines de concreto rectangulares de los proveedores.

En este proyecto se siguieron las siguientes políticas para el pavimento de adoquines de concreto:

1. Producir los adoquines con seis meses de antelación a su colocación o puesta en servicio.
2. Se utilizaron sistemas de cunetas para el drenaje de agua lluvia; se utilizaron ductos de drenaje abiertos sólo en los lugares donde el flujo de tráfico no destruyera los ductos en el futuro.
3. Se colocó una red de tubos vacía en el lleno, lo que permitirá hacer instalaciones adicionales en la terminal, en un futuro, sin tener que levantar los adoquines.

En el proyecto de la terminal del ferry se llevó a cabo compactación profunda utilizando un eje vibratorio, lográndose un asentamiento inmediato de entre 0,4 m y 0,5 m a una altura de llenado de 8 m. No se ha tenido ningún tipo de asentamiento en el llenado durante los primeros seis años de operación.

No han aparecido nuevos resaltos, debido a las últimas modificaciones, lo cual se cree satisface a los conductores. En esta nueva terminal del ferry, pa-

san cerca de dos millones de vehículos cada año.

6. ALTERNATIVAS DE DISEÑO PARA LA RESTAURACIÓN DEL PAVIMENTO DE ADOQUINES DE CONCRETO EN LA TERMINAL DE CONTENEDORES

Como se mencionó arriba, se debe llevar a cabo un proyecto de restauración en el pavimento de la terminal de contenedores, debido a los graves asentamientos. Se han estudiado y ensayado varios métodos.

Se llevaron a cabo pruebas con un deflectómetro de impacto por parte del Instituto Sueco de Transporte y Caminos, con el fin de poder tener valores relevantes de los Módulos de Elasticidad Dinámica (E-Dyn) del lleno de arena existente y del pavimento de adoquines de concreto. Se obtuvieron los siguientes valores:

Espesor	Capa	Módulos E-Dyn (MPa)
130 mm	Adoquines de concreto y arena	1 500 - 2 000
300 mm	Capa de base	250
3,6 m	Llenado arena (fundación)	120 - 150

Los parámetros de diseño para la carga dinámica del tráfico de la terminal se muestran en la Tabla 1.

Cabe anotar que la carga frontal de 95,7 t está relacionada con la carga completa de un contenedor de 12 m (40 pies). Para poder reflejar la situación actual en la terminal se incluyó en los cálculos un peso de ejes de 74,4 t.

El número de movimientos de FLT (cargados) se calculó para una vida útil proyectada de 20 años, en 200 000. Se consideró también la carga estática de los contenedores apilados.

Se contrató la compañía de consultoría Holandesa de Heidimij Advies, con el fin de elaborar los cálculos de los diseños de los pavimentos discutidos. Se llevaron a cabo pruebas de laboratorio por parte del Instituto de Investigación Sueco de Cemento y Concreto - CBI y las pruebas de campo fueron elaboradas por la compañía constructora de NCC.

El dimensionamiento de la construcción de la superficie se hizo utilizando un modelo multi capa linear elástico. El modelo representa la construcción de la superficie como un sistema multicapa en el cual los materiales se caracterizan por módulos elásticos (E) y el coeficiente de contracción transversal (μ) (Módulo de Poisson). Se asume que los materiales son homogéneos e isotrópicos, y que las capas se extienden infinitamente en el plano horizontal.

6.1 DISEÑO BASADO EN ADOQUINES DE CONCRETO

Se estudiaron varios diseños para la construcción de la superficie. El trabajo del diseño cubría dos alternativas básicas diferentes:

1. Nivel de servicio mantenido.
2. No mantener el nivel de servicio, es decir, construir una estructura adicional encima del pavimento de adoquines de concreto existente, en la cual sólo la subestructura existente se incluía como parte de la nueva estructura de la nueva subestructura.

Los cálculos iniciales de la Alternativa 2 mostraron que se requería elevar la superficie en unos 600 mm. Esta alternativa se omitió luego, debido a los problemas para conectar el patio con las estructuras existentes como muelles y bodegas.

Una de las alternativas que se elaboró más adelante fue:

100 mm - adoquines de concreto.
40 mm - capa granular.
450 mm - concreto pobre.
150 mm - grava.

El concreto pobre consiste de una capa de agregado grueso, arena, y agua, en proporciones tales que la resistencia del cubo a 7 d sea, al menos, 3 MPa.

6.2 DISEÑO BASADO EN ASFALTO

Con el fin de comparar la alternativa basada en asfalto, se elaboraron cálculos paralelos para cada alternativa pavimentos de adoquines de concreto. Para la construcción mostrada arriba, la alternativa en asfalto correspondiente fue:

200 mm - asfalto de alta estabilidad.
450 mm - concreto pobre.
100 mm - grava.

6.3 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS ESTUDIADAS

Desde el punto de vista técnico (conveniencia, experiencia y mantenimiento), el consultor propuso la alternativa pavimentos de adoquines de concreto como la más favorable.

Un costo estimado de las dos alternativas, dio el siguiente costo unitario[6]:

Diseño en adoquines de concreto	596 SEK/m^2
Diseño basado en asfalto	761 SEK/m^2

Tomando en consideración una área mínima requerida de restauración de 30 000 m^2, se calculó un costo total de 18 millones de SEK (2,25 millones US$) para la alternativa pavimento de adoquines de concreto excluyendo costos de consultoría, trabajos de drenaje , etc.

Más adelante se dieron cuenta que la gran cantidad de adoquines de concreto de segunda mano, serían un problema para el puerto, así como también los otros materiales del antiguo pavimento que no se utilizarían en el nuevo diseño.

6 1 SEK = Corona Sueca ≈ 0,125 US$.

Se estimó que el costo total del proyecto sería demasiado alto, de tal manera que se deberían encontrar soluciones alternativas.

7. DISEÑO MODIFICADO BASADO EN ADOQUINES DE CONCRETO – RECICLAJE

El costo estimado del proyecto incluía una larga porción para comprar nuevos materiales y para transporte. El aspecto arriba mencionado de quedar con una grandísima cantidad de material usado, después de la terminación del proyecto, les dio la idea del reciclaje.

Junto con los consultores, se decidió la siguiente estructura para el diseño del pavimento de adoquines de concreto:

100 mm - adoquines de concreto.
40 mm - arena.
200 mm - concreto pobre.
500 mm - estabilización de arena-cemento modif.

El agregado grueso del concreto pobre podría consistir de adoquines de concreto molidos para ser mezclado con la gravilla de la construcción actual. Debido a la confiabilidad requerida de la homogeneidad del concreto pobre, se concluyó que la mezcla se debía realizar en una planta de mezcla.

La estabilización de arena-cemento modificada es una mezcla de arena y material granular entre 0 mm y 20 mm en proporciones 50/50 y cemento entre el 6 % y el 8 %. La prueba de cubo debería dar un promedio de 8 MPa después de 28 d.

Se llegó a la conclusión que esta mezcla podría consistir de la arena y grava de la construcción actual del pavimento. Sin embargo, los costos relacionados con la excavación, el transporte a la planta de mezcla, llevarlo de vuelta e instalarlo, eran una parte significativa el precio calculado. Entonces se llegó a la idea de mezclar en el sitio la capa estabilizada. Un contratista sueco presentó un equipo apropiado para ello, el MIX CUT H16C, el cual operaría con una profundidad de capa de 500 mm (Figura 5). Se podría obtener una mezcla apropiada añadiendo cemento y agua.

El MIX CUT H16C es un excavador transformado en el cual el cubo se ha reemplazado por un equipo con rodillo de corte grande, que al mismo tiempo que excava la capa superior, la mezcla con material derramado en la superficie.

Como esta técnica de mezclado en el sitio era relativamente nueva para el puerto de Helsingborg, se llevaron a cabo pruebas a gran escala.

8. PRUEBAS REALIZADAS

Se llevaron a cabo dos tipos de pruebas:

1. Mezcla en el sitio de la estabilización modificada arena-cemento.
2. Pruebas de compresión de:
   - Cubos de concreto pobre, basado en adoquines de concreto triturado y gravilla del pavimento existente.
   - Cilindros de la mezcla en el sitio de la estabilización arena-cemento modificada.

La mezcla en el sitio de la estabilización modificada se probó en un sitio separado. Capas de gravilla de 230 mm (0 mm a 50 mm) y 200 mm de arena del pavimento existente, se extendieron aparte y luego se compactaron. Después de haberse comprobado el contenido de agua, se colocó cemento uniformemente sobre toda el área (150 kg/m^3) y el MIX CUT H16C se pasó una sola vez sobre la superficie. A continuación se añadió agua sobre toda el área para obtener un contenido del 6 % de agua. A continuación se pasó sobre la superficie una vez más.

Se perforaron núcleos de concreto de la losa después de siete días, para pruebas de compactación. Los resultados de las pruebas mostraron un promedio de 7,0 MPa.

La mezcla del concreto pobre se elaboró en los laboratorios del CBI, con los adoquines de concreto triturados y la gravilla del pavimento existente.

Las proporciones de los diferentes componentes (en kg/m^3), siguieron las recomendaciones del consultor Holandés:

cemento - 150
agua - 150
concreto triturado - 1 000
gravilla - 1 125

El costo del diseño del pavimento con adoquines reciclados se calculó en 437 SEK/m^2 dando un costo total al presupuesto del proyecto de 13,1 millones de SEK. Esto es equivalente a una reducción en el costo del proyecto de más del 25 % comparado con la solución tradicional.

9. RESUMEN DE LAS EXPERIENCIAS DE PAVIMENTACIÓN CON ADOQUINES DE CONCRETO EN EL PUERTO DE HELSINGBORG DESPUÉS DE UNA DÉCADA DE OPERACIÓN

Las experiencias de más de 10 años de pavimentos de adoquines de concreto en el puerto de Helsingborg, se resumen en la política del pavimento de adoquines de concreto:

1. La subbase inferior debe contar con suficiente capacidad de soporte de carga.
2. Los adoquines se deben producir con un mínimo de 6 meses de anticipación a la instalación en el proyecto, ya que la Norma Sueca ha sido de adoquines de concreto de calidad K60 (60 MPa a los 28 d).
3. El drenaje de agua se lleva a cabo en la forma de pendientes de servicio tradicionales a las cunetas, ya que los ductos de drenaje no soportan el tráfico de FLT .
4. Los adoquines de concreto serán de forma rectangular ya que es muy difícil volver a instalar

adoquines de formas diferentes después de haberse sacado.

5. Una red de tubería vacía se colocará en el terreno para permitir modificaciones con un mínimo de molestias para el pavimento de adoquines de concreto en proyectos grandes de pavimento (el pavimento en asfalto se podría utilizar en los carriles principales de tráfico).
6. Los adoquines viejos no pueden ser utilizados en áreas grandes de repavimentación.
7. Es posible utilizar material existente, incluyendo adoquines de concreto triturados, en un proyecto de restauración o reparación.