BLOCK PAVING FOR MILITARY AIRFIELDS [1] [2]

John A. EMERY
Consultant
JOHN EMERY CONSULTANTS LTD.
Wootton, Bedfordshire, **United Kingdom**

SUMMARY

The effectiveness of concrete block paving for surfacing aircraft pavements is now widely recognised both for military airfields and civilian airports.

The concept of using concrete block paving -CBP for surfacing modern aircraft pavements was recognised by the author at Luton International Airport following a small-scale trial in 1981. Shortly after this, trials were also made by the, then, Property Services Agency Airfields Branch at Royal Air Force Stations in the UK where it is now widely used, generally for surfacing aircraft parking areas and helicopter pads. Approval has now been given and standards set for the use of CBP by the Federal Aviation Administration -FAA, the U.S. Army Corps of Engineers on behalf of the United States Air Force, the UK Civil Aviation Authority and the UK Ministry of Defence - MOD.

It is estimated that, world-wide, over one million square metres of CBP has now been used on aircraft pavements.

The characteristics of the wide range of aircraft using pavements at military airfields in terms of their speed, weight, tyre pressures and susceptibility to foreign object damage - FOD, impose strict requirements for their surfaces. Aircraft using a military airfield may vary from a small jet fighter training aircraft of 8,5 t to large flight refuelling aircraft in excess of 245 t.

As newer and heavier aircraft are introduced the demands on pavements serving these aircraft will inevitably increase. New design techniques and improved materials for pavement construction will be essential for safe and economic military aircraft operations. Recent developments in pavement research and innovations in concrete block paving technology will be able to meet these challenges.

This paper:

1. Examines the history of pavements at military airfields.
2. Comments on pavement design considerations.
3. Considers the special needs for surfaces of pavements for military aircraft.
4. Discusses the use of concrete block paving on military aircraft pavements.
5. Identifies the specifications used for concrete block paving at military airfields.

"WITH DECREASING MILITARY BUDGETS, THE ABILITY TO DESIGN, CONSTRUCT AND MAINTAIN PAVED SURFACES WITH REDUCED LIFE CYCLE COSTS PROVIDES A MEANS TO MEET FORCE PROTECTION REQUIREMENTS WITH REDUCED FUNDS" [1] (DR GEORGE HAMMITT II - US ARMY CORPS OF ENGINEERS - AIRFIELD AND PAVEMENTS DIVISION).

1. INTRODUCTION

The quote given above effectively summarises the dilemma now facing airfield pavement engineers world-wide. How do we, given lower finance, provide durable, high strength pavements for military aircraft having ever increasing loads and tyre pressures?

The development of pavement technology has not kept pace with that of military aircraft over the last 50 years. This is hardly surprising when one considers the vast funds made available for military aircraft research and development compared to that dedicated to aircraft pavements. We still use the empirical California Bearing Ratio - CBR test value and the Equivalent Single Wheel Load - EWSL as the starting point for the design of pavements. The CBR test was developed in the 1920's for highways design and adapted by the U.S. Corps of Engineers for airfield pavement design in the early 1940's.

Many of the design methods currently used for aircraft pavement design are derived and extrapolated from this early work of the U.S. Army Corps of Engineers.

The FAA and the U.S. Army Corps of Engineers are now urgently addressing the shortfall between aircraft and pavement technology by a multi-million dollar investigation into design solutions for existing and future aircraft.

Despite controversy relating to the contribution that CBP may make to the strength of the overall pavement construction the author, nonetheless, considers that it provides a durable, economical and effective means of surfacing many military aircraft pavements.

2. HISTORY OF MILITARY AIRFIELD PAVEMENTS

The U.S. Army was the first armed service to acquire an aeroplane when, during 1907, a contract was

---

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. The References are inluded only in the original version of each paper.

2 This is the original version of this paper.

placed with the Wright brothers to provide an aircraft for military purposes. The technology involved was basic. Apart from a firm level surface, hardly a thought would have been given to a pavement construction from which to operate the aircraft.

The military potential of aircraft was soon recognised and their development from a means of reconnaissance to that of bombing was rapid. As weights of aircraft increased, so the need for structurally designed manoeuvring surfaces became a necessity.

In these early days the weights of aircraft and the undercarriage wheels used would have been similar to those of vehicular traffic and it is to be expected that pavement design would be based on highway methods.

In the UK, airfield pavement design commenced in 1937 when the first paved runways were constructed using road design methods as a guide. Flexible pavements were constructed using hard-core topped with two courses of tar-macadam and a surfacing coat of mastic asphalt. Rigid concrete pavements were either 150 mm or 200 mm thick slabs generally laid directly on the subgrade. These pavements soon failed under the increasing weight of new aircraft and were later strengthened by overlaying them with a 65 mm thickness of tar-macadam and a surfacing of 20 mm of rolled asphalt.

In the United States, during World War II, the Corps of Engineers conducted trials using experience gained from the California Division of Highways. They produced an engineering manual and handbook which contributed to their success in completing some 1 100 military and civilian airports worldwide by the Spring of 1943.

As with any engineering discipline, knowledge advances as a result of failures. Failure may be defined as: "The shortfall between performance and standards" [2]. So, it will be evident that when, on 6 May 1941, the first long range military aircraft, a Douglas Aircraft Company, XB-19 (72,7 t) ploughed through a pavement to a depth of 300 mm, failure conditions prevailed. This prompted the development of the first design methods specifically for military aircraft pavements. These were published in 1945 [3] using Westergaard's equations for calculating the stress induced in concrete pavements by aircraft loading.

3. PAVEMENT DESIGN CONSIDERATIONS

The design methods currently used for flexible and rigid pavements are still generally based on extrapolating empirical methods of highway engineering origins referred to above. These pavement design and evaluation methods are no longer considered acceptable for the newer, heavier and more complex aircraft now in use and being developed.

The FAA has recognised that the serious gap between aircraft and aircraft pavement technologies may delay the introduction of new and larger civilian aircraft. Their concern is that current design procedures will not accurately predict the load interaction between closely spaced landing gear on the new generation aircraft.

A huge research programme, the FAA Airport Instrumentation Project [4], is presently underway in which the FAA, with support from the U.S. Army, U.S. Air Force and aircraft manufacturers, have instrumented a section of runway at Denver International Airport to collect data over at least 6 years to study the in-service performance of its pavement structure and materials. In addition to the Denver tests, the FAA is constructing a full scale pavement testing machine to develop and verify new procedures that can be used to design aircraft pavements *NE: The project was funded by the US government and the facility is being built at the FAA Technical Center in Atlantic City, New Jersey.* Of particular interest to all aircraft pavement engineers is the fact that current information regarding these two projects may be obtained via the Internet on:

1. http://www.airtech.tc.faa.gov/dbase/dbpro/dbpro.htm
2. http://www.airtech.tc.faa.gov/pavement/testmach.htm

4. SPECIAL NEEDS FOR MILITARY AIRCRAFT PAVEMENT SURFACES

As more sophisticated fighters and heavier bombers are introduced there will be increasing concern as to what effect their higher tyre pressures and jet efflux temperatures will have on existing pavement surfaces.

The specific characteristics of the wide range of aircraft using pavements at military airfields are identified in terms of their speed, weight and tyre pressures. Additionally, of particular importance is the susceptibility of modern military aircraft to FOD. Consequently, the surfaces of military aircraft pavements must be scrupulously clean and free from loose material such as stones, sand etc., to avoid the risk of ingestion of any 'foreign object' into jet engines. This imposes strict requirements for the integrity of pavement surfaces.

Aircraft using any military airfield may vary from a British Aerospace Hawk (Figure 1), with a maximum take off weight of just 8,5 t to a VC 10 aircraft converted for in flight refuelling operations (Figure 2) having a take off weight exceeding 245 t. Current military aircraft may have tyre pressures varying between 0,23 MPa in the case of a British Aerospace Jetstream to an exceptional 2,86 MPa in the case of the Lockheed SR-71 Blackbird.

At all times there can be a risk of pavement failure (as previously defined). Failure will not necessarily be dramatic as was the case of the aircraft ploughing through the surface of a pavement mentioned earlier. If we examine the pavement shown in Figure 3 it is evident that the pavement has cracked and

maintenance has been carried out by means of banding. This pavement is still capable of supporting aircraft but it has 'failed' by virtue of the fact that it is no longer capable of providing a FOD-free surface. Compare this with the pavement shown in Figure 4 which has been successfully surfaced with CBP.

The Vertical Takeoff and Landing - VTOL Harrier aircraft (Figure 5) imposes severe, potentially damaging conditions on pavements unless operated with caution. The vectored thrust at vertical take off and landing imposes a typical jet efflux temperature of 700 °C, which can raise the temperature of a concrete surface to 300 °C to 350 °C, if residence times are excessive. This will initiate erosion of the concrete surface and hence FOD problems. Research at Loughborough University [5] into jet-blast temperatures has resulted in the development of heat resistant manmade aggregates which are capable of improvements in spalling resistance. This research does, however, beg the question, why should it be necessary to provide a special surface for a tactical aircraft which was to be capable of operating without the need of an airfield? Nevertheless, we can be assured that if future aircraft are required to operate with excessive efflux temperatures, technology is available to respond accordingly.

5. BLOCK PAVING ON MILITARY AIRFIELDS

The effectiveness of small element paving was recognised for military engineering purposes well over forty years ago. It is worth including here an extract from a handbook of military engineering [6] to recognise the fact that the technology of CBP on aircraft pavements is hardly a new innovation:

"Methods which have been used are:

1. In Italy, the ends of a runway over ploughed land with a clay subsoil were constructed of bricks laid on edge in a herringbone pattern upon a 2 " (50 mm) underlay of sand. A concrete kerb was provided, and the joints were grouted with sand/cement.
2. In Eastern India, a heavy bomber airfield on a clay-sand site was built as follows: The base, 6 " (150 mm) thick, consisted of two layers of bricks, laid on the flat and with joints filled with sand. The surface course comprised one layer of first-class bricks on edge 5 " (125 mm) deep, set in 1:4 cement mortar.
3. In Holland, organic soil was removed to a depth of 12 to 16 " (305 to 400 mm) and replaced by clean sand, thoroughly compacted. A single layer of local bricks, 4 " (100 mm) thick, was laid in either stretcher bond or herringbone pattern, and tamped by hand with wooden tampers. Joints were filled either by spreading a 3/4 " (19 mm) layer of sand on the surface and brushing into the joints with water, or by the use of a sand/cement grout".

The concept of using CBP on modern aircraft pavements was developed in 1981 at Luton International Airport and later reported by the author [7]. Following successful trials at Luton, approximately 18 000 m^2 of CBP was used to surface nine apron stands and the two runway end turning areas. Shortly after the Luton experience with CBP, the then, Property Services Agency - Airfields Branch conducted their own tests at RAF stations in the UK and to date it has been used at ten RAF airfields. It is estimated that, world-wide, over one million m^2 of CBP has been used on aircraft pavements.

5.1 JOINTING SAND EROSION

At Luton Airport, it was evident after some time in use, that jet efflux from engines was eroding jointing sand from the CBP. This problem was investigated by the author [8] and after experimenting with a range of cementitious materials, a low viscosity, elastomeric liquid pre-polymer was specifically formulated to stabilise and seal the jointing sand.

In addition to sealing and stabilising the jointing sand the sealer was found to contribute to the strength of the pavement, resist penetration of water and fuels through joints and resist stain penetration and weed growth in joints.

The effectiveness of this pre-polymer was demonstrated during a combined study by the author and British Aerospace (Military Aircraft) Ltd. at their Hot Gas Laboratory [9]. The results indicated that considerable erosion resistance is provided by the polymer. An untreated block paving panel showed extensive loss of jointing sand under increasing ambient temperature pressures, up to a jet pressure ratio - JPR of 2,0. At this pressure the laying course sand was penetrated and 'fluidised' and blocks were lifted. Polymer treated samples were unaffected by high pressure ambient temperature jets, up to JPR = 4,0, when subjected to runs of up to 60 sec duration. The maximum operational limit obtained for the treated blocks when subjected to a JPR of 1,8, nozzle temperature 527 °C, was a residence time of 5 sec. This exceeded the results obtained from previous studies.

A recommended specification for sealing CBP on aircraft pavements is given in the Appendix.

5.2 FAILURE OF CBP AT LUTON

Failures of CBP on the turning areas at Luton Airport represented a major setback for this system of surfacing aircraft pavements. In an effort to reduce construction time a mechanically laid system of block paving was adopted which proved unsuitable for a situation where jet blast was prevalent. These failures are fully reported in a report [10] by Prof. John Knapton and the author, which was commissioned by the CAA. The conclusions of this report attributed the main causes of failure to:

1. Abnormal joint widths around 'clusters' of the mechanically laid block paving system.
2. The inclusion of a rigid concrete section within

the areas of CBP.
3. Joints were not resistant to erosion and ingress of fuels and water, (i.e. not sealed).
4. Lack of maintenance and routine inspections.

The CAA report includes, comprehensive information on situations where CBP is used as an aircraft pavement surfacing material, examines the experience of CBP to date and provides design and specification guidance. It also contains recommendations for pavement designers, contractors, owners, operators and users of aircraft pavements surfaced with CBP.

5.3 NEW DEVELOPMENTS IN CBP

Most military aircraft pavements surfaced with CBP have, to date, used either rectangular or S-shaped units, which may be mechanically laid. As mentioned above one of the reasons for failure of CBP at Luton Airport was the wide joints that developed around 'clusters' of mechanically laid units. This problem may now be overcome by the use of a new concrete block paving system manufactured under the proprietary name of "XeneX". The benefits claimed for this system are summarised as follows:

1. Excellent load bearing capabilities contributing to overall pavement strength.
2. Greater resistance to horizontal braking and turning forces.
3. Avoidance of jointing erosion by jet blast when correctly sealed.
4. Less reliance on edge restraints.
5. Rapid and accurate machine laying with one man operation.
6. Consistent joint widths and complete elimination of "cluster effect".
7. Reduced supervision requirement.
8. Installation exactly as manufactured with no manual "stitching".
9. Ease of installation with all types of powered or manual machines.

The cruciform shape of the blocks enables them to lock together more positively than conventional blocks enabling them to resist horizontal forces and any tendency to creep. The dentated shape of the blocks aids self-location during laying and causes them to "lock up", much like cog wheels locked together. It is the author's opinion that the features of this block makes them particularly appropriate for military aircraft pavements where they will be capable of resisting the severe turning forces imposed by the multi-wheeled main undercarriages of heavy bombers as well as the single, small wheel undercarriages of fighter aircraft with their exceptionally high tyre pressures. An application of this mechanically laid block paving system is shown in Figure 6. Projects recently completed in Germany and at an airport in Denmark have demonstrated that laying rates were similar to those for other shaped blocks where both "Probst" and "Optimas" mechanical laying machines were used.

6. SPECIFICATIONS FOR CBP ON MILITARY AIRFIELDS

It is satisfying to report that the use of CBP has been independently investigated by the authorities given in Table 1 and found to be an appropriate means of surfacing military aircraft pavements in the following areas: Aircraft parking stands, helicopter pads, slow speed taxiways and aircraft maintenance areas not subject to excessive jet blast. The table gives references for specifications for CBP, which most of these authorities now have available, together with the structural contribution CBP each authority considers to make to a pavement in terms of equivalence to a thickness of asphalt surfacing.

It will be seen from Table 1 that there is a considerable divergence of opinion as to what effect CBP is considered to contribute to the overall pavement strength, in terms of its equivalence to an asphalt surface. A convergence of opinion is now essential if we are to be able to provide economical designs for pavements surfaced with CBP.

7. CONCLUDING REMARKS

This paper has set out the benefits of using CBP for surfacing military aircraft pavements and drawn attention to its widespread acceptance by authorities responsible for these pavements. New man-made aggregates are now in existence that are capable of resisting higher jet efflux temperatures from future aircraft that may impinge on pavement surfaces. If necessary, it would be possible to use these materials for manufacture of heat resisting block paving.

A new block paving system is now available capable of being mechanically laid without "Cluster effect" and with consistent joint widths making it eminently suitable for aircraft pavements.

It is the author's opinion that all CBP laid on military aircraft pavements should be sealed to prevent erosion of jointing sand and to prevent ingress of water and fuels through the pavement surface. This is corroborated by all the authorities involved with military aircraft pavements listed in Table 1 who specify the use of a sealer with CBP.

By the time the FAA / U.S. Army Corps of Engineers publish design recommendations, following their pavement research project at Denver International Airport, it is essential that the a consensus of opinion is available from the concrete block paving industry to be able to state with confidence the contribution (if any) CBP makes to pavement strength.

8. ACKNOWLEDGEMENTS

U.S. Army Corps of Engineers and British Aerospace Defence Ltd.

9. REFERENCES

1. HAMMET, George M. Roads and Airfields : A History and a Future. -- P.38. // In : INTERNATIONAL CONFERENCE ON

ROADS AND AIRFIELDS PAVEMENT TECHNOLOGY (2 : 1995 : Singapore). Proceedings. Vicksburg : U.S. Army Corps of Engineers, 1995. -- P.v.

2. BIGNELL, V. and FORTUNE, J. Understanding Systems Failures. -- Manchester : Manchester University Press, 1986. -- P.v. -- ISBN 0-7190-0973-1.

3. AIR MINISTRY WORKS DEPARTMENT. Design and Construction of Concrete Pavements. -- London : The Ministry, 1945. -- P.v. -- (Air Publication No. AP 3129A).

4. U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORT, FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. Airport Pavements : Solutions for Tomorrow's Aircraft. -- Washington : FAA, 1993. -- P.v.

5. AUSTIN, S. A., ROBINS, P. and RICHARDS, M. Jetblast temperature-resistant Concrete for Harrier Aircraft Pavements. // In : Journal The Structural Engineer. -- Vol.70, No. 23/24 (Dec., 1992); P.427-432.

6. MILITARY ENGINEERING. Roads and Airfields. -- London : The War Office, 1957. -- P.v.

7. EMERY, John A. Use of Concrete Blocks for Aircraft Pavements. // In : Proceedings Institution of Civil Engineers. -- Part 1, No. 80 (Apr., 1986); P.451-464.

8. EMERY, John A. Block Paving - To Seal or not to Seal?. -- P.605-611. // In : INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCRETE BLOCK PAVING : PAVE ISRAEL'96 (5 : 1996 : Tel-Aviv). Proceedings. -- Tel-Aviv : Technion, 1996. -- 727P.

9. BRITISH AEROSPACE PLC. Report BAE-WWT-EN-GEN-00013. -- London : BA, 1991. -- Unpublished data.

10. KNAPTON, John and EMERY, John A. The use of pavers for aircraft pavements. -- London : CAA, 1996. -- 118P. -- (CAA, Paper 96001).

11. ANDERTON, G. Concrete Block Pavements for Airfields. -- London : Department of the Army. Waterways Experiment Station. Corps of Engineers, 1991. -- P.v. -- (Technical Report GL-91-12).

12. DEFENSE ESTATE ORGANIZATION (WORKS), MINISTRY OF DEFENSE. Concrete Block Paving for Airfields. London : Ministry of Defense, 1996. -- P.v. -- (Specification 035).

13. McQUEEN, Roy D., KNAPTON, John, EMERY, JOHN A., and SMITH, David. Airfield Pavement Design with Concrete Pavers. -- Sterling, VA : ICPI, 1994. -- P.v.

14. WOODMAN, G. R. and ROBINSON, N. Concrete Block Surfacing for Airfield Pavements. // In : Proceedings Institution of Civil Engineers. -- (Aug., 1996); P.168-176.

15. EMERY, John A. Personal Correspondence with Bruce Roadway; Federal Airports Administration, New South Wales, Australia, November 12, 1996.

10. APPENDIX - SPECIFICATION FOR SEALING CBP ON AIRCRAFT PAVEMENTS

1. After final compaction of the jointing sand the concrete block paving shall be carefully swept to remove any sand remaining in chamfers. The joints shall then be stabilized with "ACM Pavseel", or similar, used in full accordance with the manufacturers Health and Safety requirements. The sealer shall be applied directly to the surface of the pavers and allowed to fill the chamfers and penetrate joints before squeegeeing any excess material, using a foam rubber squeegee from the surface of the pavers.
2. The sealer shall be a moisture curable liquid pre-polymer in a mixed aromatic/aliphatic solvent having the following properties:
   - Surface curing time not to exceed 24 h.
   - Solids content shall be 20 % (± 1 %).
   - Be resistant to oils, aviation fuels, petrol, and de-icing fluids.
   - Appearance shall be clear to straw coloured and be free from foreign matter.
   - Elongation at break of film - not less than 250 %.
3. The sealer shall have a proven safety and performance record of use on aircraft pavements surfaced with concrete block paving.
4. The sealer shall penetrate the joints to a minimum depth of 15 mm and shall form a flexible elastomeric water and fuel resistant bond.
5. The mechanical properties of the stabilised jointing material shall comply with the following:
   - Three No. prismatic beam specimens of square section 38 mm x 38 mm, 250 mm in length, shall be made by impregnating the proposed jointing material with the sealer to saturation. Any excess sealer should then be removed.
   - The prismatic beams shall be tested at a minimum age of 7 d or after the material has fully cured, whichever is longer.
   - Each specimen, supported at a span of 200 mm, must be capable of sustaining a central lateral deflection of 15 mm on 10 consecutive occasions without visual distress. The load shall be applied incrementally taking not less than 1 min. Following this a single deflection of 20 mm shall be sustained for 1 min without visual distress.
   - In all of the above, each specimen shall return to its original shape.

AUTHORITY *AUTORIDAD*	REFERENCE *REFERENCIA*	EQUIVALENT THICKNESS *ESPESOR EQUIVALENTE*
U.S. Army Corps of Engineers ***Cuerpo de Ingenieros de los E.U.A.***	[11]	162 mm
UK Ministry of Defence ***Ministerio de la Defensa del Reino Unido***	[12]	50 mm
Interlocking Concrete Paver Institute - ICPI (U.S.A.) ***Instituto del Adoquín de Concreto (E.U.A.)***	[13]	100 mm
Civil Aviation Authority - (Knapton & Emery) ***Autoridad de Aviación Civil (Knapton & Emery)***	[10]	110 mm
TPS Consult Ltd. ***TPS Consult Ltd.***	[14]	Little or no contribution *Poca o ninguna contribución*
Federal Airports Corporation (Australia) ***Corporación Federal de Aeropuertos (Australia)***	[15]	Little or no contribution *Poca o ninguna contribución*

Table 1. Equivalent thickness of the layer of concrete pavers specified by several authorities.
Tabla 1. *Espesor equivalente de la capa de adoquines especificado por diversas entidades.*



Figure 1. BAe HAWK.
Figura 1. *Avión HAWK de la BAe.*



Figure 2. BAe VC10 Flight Refuelling Taker.
Figura 2. *Tanquero para reabastecimiento en vuelo, VC10 de la BAe.*



Figure 3. Damaged PQ concrete surface.
Figura 3. *Superficie de un pavimento de concreto deteriorado.*



Figure 4. CBP surfaced pavement.
Figura 4. *Pavimento recubierto con adoquines de concreto.*



Figure 5. BAe Harrier VSTOL aircraft.
Figure 5. *Avión Harrier VSTOL de la BAe.*

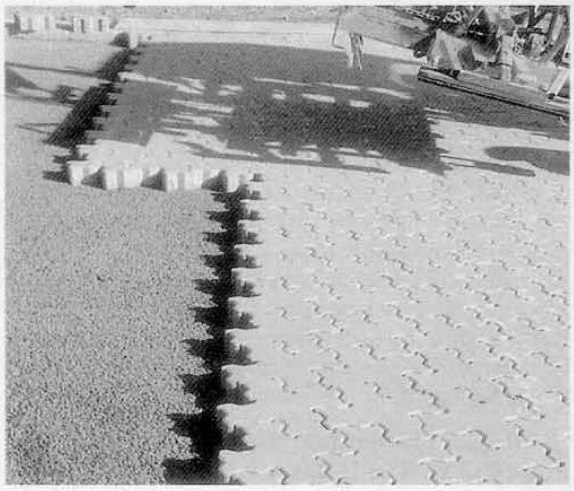

Figure 6. "XeneX" concrete block paving system.
Figura 6. *Sistema "XeneX" de adoquines de concreto.*

PAVIMENTACION CON ADOQUINES PARA AEROPUERTOS MILITARES [3] [4]

John A. EMERY
Consultor
JOHN EMERY CONSULTANTS LTD.
Wootton, Bedfordshire, Reino Unido

RESUMEN

La efectividad del pavimento de adoquines de concreto como superficie de pavimento para aeronaves es reconocida ahora, tanto para aeropuertos militares como civiles.

El concepto de utilizar pavimentos de adoquines de concreto como superficie para pavimentos modernos para aeronaves, fue propuesto por el autor en el aeropuerto internacional de Luton, después de adelantar unos ensayos a pequeña escala en 1981. Poco tiempo después se hicieron ensayos por parte de la, por entonces, Property Services Agney Airfields Branch en varias estaciones de la Fuerza Aérea Real – RAF del Reino Unido, en las cuales es ampliamente utilizado hoy en día, por lo general como pavimento para áreas de estacionamiento de aeronaves y de helicópteros. La Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos – FAA, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (en nombre de la Fuerza Aérea del mismo país), la Autoridad de Aviación Civil – CAA y el Ministerio de Defensa – MOD del Reino Unido, han aprobado normas para la utilización de los pavimentos de adoquines de concreto.

Se estima que en todo el mundo se ha utilizado más de un millón de m^2 de pavimentos de adoquines de concreto en pavimentos para aeronaves.

Las características del amplio rango de aeronaves que utilizan los pavimentos en los aeropuertos militares, en términos de su velocidad, peso, presiones de inflado de las llantas, y la susceptibilidad al daño por objetos extraños – FOD, imponen unos requisitos estrictos para sus superficies. La aeronaves que utilizan un aeropuerto militar pueden variar desde un pequeño avión de propulsión a chorro para entrenamiento de 8,5 t hasta una avión tanque para reabastecimiento de aeronaves en vuelo de más de 245 t.

A medida que se introducen aeronaves más grandes y más pesadas, la demanda por pavimentos que le sirvan a esas aeronaves se incrementará inevitablemente. Será esencial contar con nuevas técnicas de diseño y materiales mejorados para la construcción de pavimentos, por razones de economía y seguridad en la operación de aeronaves militares. Los desarrollos recientes en la investigación de pavimentos y las innovaciones de la tecnología de la pavimentación con adoquines de concreto serán capaces de cumplir con ese desafío.

3 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. La Bibliografía se incluye sólo en la versión original de cada ponencia.

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

Esta ponencia:

1. Examina la historia de los pavimentos para aeropuertos militares.
2. Hace comentarios sobre las consideraciones para el diseño de pavimentos.
3. Tiene en cuenta las necesidades especiales de las superficies de los pavimentos para aeronaves militares.
4. Trata el uso de los pavimentos de adoquines de concreto en aeropuertos militares.
5. Identifica las especificaciones usadas para pavimentos de adoquines de concreto en aeropuertos militares.

"CON EL DECRECIMIENTO DE LOS PRESUPUESTOS MILITARES, LA HABILIDAD PARA DISEÑAR, CONSTRUÍR Y MANTENER SUPERFICIES PAVIMENTADAS CON COSTOS TOTALES REDUCIDOS, DURANTE SU VIDA ÚTIL, PROPORCIONA UN MEDIO PARA ALCANZAR LOS REQUISITOS DE LAS FUERZAS DE PROTECCIÓN A PARTIR DE PRESUPUESTOS REDUCIDOS" [1] (Dr. GEORGE HAMMITT II – CUERPO DE INGENIEROS DEL EJÉRCITO DE LOS ESTADOS UNIDOS – DIVISIÓN DE AEROPUERTOS Y PA-VIMENTOS).

1. INTRODUCCIÓN

La cita anterior resume eficientemente el dilema que encaran los ingenieros de pavimentos para aeropuertos en todo el mundo. ¿Cómo, con el poco presupuesto, proporcionar pavimentos para aeronaves militares, siempre con cargas y presiones de llanta mayores, que sean durables y de alta resistencia?

El desarrollo de la tecnología de pavimentos no ha seguido el paso de la de las aeronaves militares en los últimos 50 años. Esto es bastante sorprendente si uno considera que grandes sumas de dinero se han dispuesto para investigación y desarrollo de aeronaves militares comparadas con las que se han dedicado a los pavimentos para aeronaves. Todavía se utiliza el valor empírico de la relación de soporte de California – CBR y el carga por eje simple equivalente – EWSL como los puntos de partida para el diseño de pavimentos. El ensayo de CBR se desarrolló en los años 20 para el diseño de autopistas y fue adaptado por el Cuerpo de Ingenieros para el diseño de pavimentos para aeropuertos a comienzos de los años 40.

Muchos de los métodos de diseño utilizados actualmente para diseño de pavimentos para aeropuertos se derivan de la extrapolación de este trabajo temprano del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos.

La FAA y el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos están trabajando urgentemente en cerrar la brecha entre la tecnología de pavimentos y de aeronaves mediante una investigación de muchos millones de dólares sobre las soluciones de diseño para las aeronaves existentes y las futuras.

2. HISTORIA DE LOS AEROPUERTOS MILITARES

El Ejército de los Estados Unidos fue el primero en adquirir un avión cuando, durante 1907, se hizo un contrato con los hermanos Wright para que le suministrara una aeronave para propósitos militares. La tecnología involucrada fue la básica. Aparte de contar con una superficie firme, no se le hubiera dado ninguna consideración adicional a la construcción de un pavimento desde el cual operar dicha aeronave.

El potencial militar de las aeronaves se reconoció rápidamente y su desarrollo desde un medio de reconocimiento a uno de bombardeo fue muy rápido. A medida que los pesos de las aeronaves se incrementaron, se hizo necesario contar con superficies de maniobra diseñadas estructuralmente.

En esos días, el peso de las aeronaves y las llantas que se utilizaban eran muy similares a los del tráfico vehicular, por lo cual era de esperarse que el diseño de pavimentos se basara en los métodos utilizados para carreteras.

En el Reino Unido, el diseño de pavimentos para aeronaves comenzó en 1937 cuando se construyó la primera pista pavimentada usando métodos de diseño de carreteras como guías. Se construyeron pavimentos flexibles utilizando una base granular recubierta con dos capas de macadam asfáltico y una capa de recubrimiento de resina asfáltica. Los pavimentos rígidos tenían losas de 150 mm o 200 mm de espesor, colocadas, por general, directamente sobre la subrasante. Dichos pavimentos fallaron muy prontamente bajo las cargas en aumento de las aeronaves y fueron reforzados posteriormente con una sobrecapa de 65 mm de macadam asfáltico y 20 mm de concreto asfáltico compactado en caliente.

En los Estados Unidos, durante la Segunda Guerra Mundial, el Cuerpo de Ingenieros llevó a cabo ensayos con base en la experiencia ganada de la División de Autopistas de California. Produjeron un manual de ingeniería que contribuyó a su éxito en completar unos 1 100 aeropuertos militares y civiles alrededor del mundo para la primavera de 1943.

De la misma manera que con la disciplina de la ingeniería, el conocimiento avanza como resultado de las fallas. Una falla se puede definir como: "La diferencia entre el comportamiento y las normas" [2]. Ésto se hizo evidente cuando, el 6 de mayo de 1941, la primera aeronave militar de amplio rango, el XB-19 de la Douglas Aircraft Company, de 72,7 t, se enterró 300 mm en un pavimento, en el cual las condiciones de fallas fueron las imperantes. Esto urgió el desarrollo de los primeros métodos de diseño de pavimentos especializados para aeronaves militares. Éstos fueron publicados en 1945 [3] usando las ecuaciones de Westergaard para calcular los esfuerzos inducidos en los pavimentos de concreto por la carga de las aeronaves.

3. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

Los métodos de diseño usados comúnmente para pavimentos rígidos y flexibles todavía están basados, en general, en la extrapolación de métodos empíricos con origen en la ingeniería de autopistas como se mencionó anteriormente. Esos métodos de diseño y evaluación ya no se consideran adecuados para las aeronaves más nuevas, más pesadas y más complejas, que se usan ahora y que se están desarrollando.

La FAA ha reconocido que la brecha seria que existe entre las tecnologías de pavimentos para aeronaves y la de las aeronaves puede demorar la introducción de las nuevas aeronaves civiles de mayor tamaño. Su preocupación es porque los métodos de diseño actuales no predecirán adecuadamente la interacción con los pavimentos de trenes de aterrizaje con muy poca separación entre ellos.

En la actualidad se está desarrollando un programa gigantesco denominado el Proyecto de Instrumentación de Aeropuertos, de la FAA [4], en el cual, con la colaboración del Ejército, la Fuerza Aérea de los Estados Unidos y los productores de aeronaves, han instrumentado una sección de pista en el aeropuerto internacional de Denver para recoger información al menos durante seis años, con el fin de estudiar el comportamiento de sus estructura y materiales bajo condiciones de servicio. Adicionalmente a los ensayos de Denver, la FAA está construyendo una máquina de ensayo de pavimentos a escala natural para desarrollar y verificar nuevos procedimientos de diseño de pavimentos para aeronaves. NE: El proyecto fue financiado por el Gobierno de los Estados Unidos y las instalaciones se están construyendo en Centro Técnico de la FAA en Atlantic City, New Jersey. De particular interés para todos los ingenieros de pavimentos para aeropuertos es que la información con respecto a esos dos proyectos se puede obtener vía Internet en:

1. http://www.airtech.tc.faa.gov/dbase/dbpro/dbpro.htm
2. http://www.airtech.tc.faa.gov/pavement/testmach.htm

4. NECESIDADES ESPECIALES DE LOS PAVIMENTOS PARA AERONAVES MILITARES

A medida que se introduzcan aviones de combate más sofisticados y bombarderos más pesados habrá más interés por el efecto de la presión de inflado de sus llantas y por la temperatura del chorro de aire que sale de sus turbinas sobre la superficie de los pavimentos.

Las características específicas del amplio rango de aeronaves que usan los pavimentos en los aeropuertos militares, se caracterizan de acuerdo con su velocidad, peso y presión de inflado de las llantas. Adicionalmente, de especial importancia es la susceptibilidad de las aeronaves militares modernas al daño por objetos extraños. Consecuentemente, las superficies de los pavimentos para aeronaves militares deben ser escrupulosamente limpias y libres de materiales tales como piedras, arena, etc., con el fin de evitar el riesgo de ingestión de "un objeto extraño" en las turbinas de reacción a chorro. Esto impone requisitos estrictos para la integridad de las superficies para pavimentos.

La aeronaves que usan cualquier aeropuerto militar pueden variar desde un Hawk de la British Aerospace (Figura 1), con un peso máximo de despegue de sólo 8,5 t, hasta una aeronave VC 10, convertida en nave de abastecimiento de combustible en vuelo (Figura 2), cuyo peso de despegue excede las 245 t. Las aeronaves militares actuales pueden tener presiones de inflado de llantas variando entre 0,23 MPa en el caso del Jetstream de la British Aerospace hasta los excepcionales 2,86 MPa del SR-71 Blackbird de la Lockheed.

Siempre puede haber, en todo momento, el riesgo de falla del pavimento (tal como se definió anteriormente). Una falla no necesariamente será tan dramática como la de la aeronave que se enterró en el pavimento, como ya se mencionó. Si se examina el pavimento que se muestra en la Figura 3, se hace evidente que se ha fisurado y que el mantenimiento se ha llevado a cabo por parcheo. Este pavimento todavía está en capacidad de soportar las aeronaves pero ha "fallado" debido al hecho de que no es capaz de proveer una superficie libre de FOD. Compárese con el pavimento mostrado en la Figura 4 que se ha recubierto exitosamente con adoquines de concreto.

El avión Harrier VTOL – De despegue y aterrizaje vertical (Figura 5), le impone condiciones severa y potencialmente dañinas a los pavimentos a no ser que se operen con precaución. El empuje dirigido en el momento del despegue y aterrizaje vertical impone una temperatura típica del chorro de aire de 700 °C, que puede elevar la temperatura de la superficie del concreto a niveles entre 300 °C y 350 °C, si se demora mucho tiempo en esta maniobra. Esto iniciaría la erosión de la superficie del concreto y, por lo tanto, los problemas con FOD. Las investigaciones en la Universidad de Loughborough [5] sobre las temperaturas de los chorros de aire de las turbinas han dado como resultado el diseño de agregados procesados, resistentes al calor, que son capaces de mejorar la resistencia al descascaramiento. Sin embargo, esta investigación trae a cuento la pregunta de que ¿Por qué se debe proveer de una superficie especial a una aeronave táctica que se supone sea capaz de operar sin la necesidad de un aeropuerto?. De todas maneras, podemos estar seguros de que si las aeronaves futuras requieren operar con temperaturas excesivas en sus chorros de escape, la tecnología está disponible para dar una respuesta acorde con la necesidad.

5. PAVIMENTACIÓN CON ADOQUINES EN AEROPUERTOS MILITARES

La efectividad de la pavimentación con pequeños elementos se reconoció, para propósitos de ingeniería militar, hace más de 40 años. Es de valor incluír aquí parte de un manual de ingeniería militar [6] para reconocer el hecho de que la pavimentación con adoquines de concreto en aeropuertos militares difícilmente se puede considerar como una innovación:

"Métodos que se han usado:

1. En Italia, los extremos de una pista construida sobre tierra arada con un subsuelo de arcilla, se construyeron con ladrillos colocados en patrón de espina de pescado sobre una capa de arena de 2 " (50 mm) de espesor. Se proveyó un bordillo de concreto, y las juntas se llenaron con arena-cemento.
2. En la India Oriental, un aeropuerto para bombarderos pesados sobre una arena arcillosa se construyó así: La base, 6 " (150 mm) de espesor, consistente en dos capas de ladrillos, colocados a los plancho, con las juntas llenadas con arena La capa superficial compuesta por una capa de ladrillos de primera clase de 5 " (125 mm) de altura (espesor), colocados sobre un mortero con cemento, con unas proporciones 1:4.
3. En Holanda, se removió el suelo orgánico hasta una profundidad de 12 a 16 " (305 a 400 mm) y se reemplazó por arena limpia, bien compactada. Se colocó una capa de ladrillos de la localidad, de 4 " (100 mm) de altura (espesor), en patrón de hiladas, y se compactaron con pisones manuales. Las juntas se llenaron con el riego de una capa de arena de ¾ " (19 mm) de espesor sobre la superficie y barriéndola hacia el interior de las juntas con agua; o se llenaron con una lechada de arena-cemento".

El concepto de utilizar pavimentos de adoquines de concreto en aeropuertos para aeronaves modernas fue desarrollado en 1981 en el aeropuerto internacional de Luton y más tarde fue presentado por el autor [7]. Después de los ensayos exitosos de Luton, se usaron unos 18 000 m2 de pavimentos de adoquines de concreto para pavimentar 9 puestos de estacionamiento de aeronaves y las dos áreas de giro en los extremos de la pista. Poco después de la experiencia de Luton con los pavimentos de adoquines de concreto, la Property Services Agency – Airfields Branch realizó sus propios ensayos en bases de la RAF Reino Unido, y hasta la fecha han sido utilizados en 10 aeropuertos de sus aeropuertos. Se estima que más de un millón de m2 de pavimentos de adoquines se han utilizado en pavimentos para aeronaves.

5.1 PÉRDIDA DE LA ARENA DE JUNTA

En el aeropuerto de Luton se hizo evidente, después de algún tiempo de uso, que el chorro de los motores de retropropulsión estaba haciendo perder la arena de la junta del pavimento de adoquines de concreto. Este problema fue investigado por el autor [8] y después de experimentar con diversos materiales cementantes, se formuló un prepolímero líquido elastomérico, de baja densidad, para estabilizar y sellar la arena de la junta.

Adicionalmente al sellado y estabilizado de la junta de arena, se encontró que el sellante contribuye a la resistencia del pavimento, a resistir la penetración de agua y combustibles a través de las juntas y a resistir la penetración de manchas y al crecimiento de grama en las juntas.

La efectividad de este prepolímero se demostró durante un estudio combinado realizado por el autor y por la British Aerospace (Aeronaves Militares) Ltd., en su laboratorio de Gases Calientes [9]. Los resultaron indicaron que el polímero suministraba una considerable resistencia a la erosión. Un panel de adoquines no tratados mostró perdidas extensas de la arena de sello con el incremento en la temperatura y presión ambiente, hasta una relación de presión de chorro – JPR de 2,0. A esta presión, se penetró hasta la capa de arena la cual fue fluidificada y se levantaron los adoquines. Los especímenes tratados con el polímero no fueron afectados por los chorros de alta temperatura y presión ambinetes, de hasta una JPR de 4,0 de hasta 1 minuto de duración. El límite máximo de operación obtenido para los adoquines tratados con el polímero fue el someterlos a una JPR de 1,8 a temperaturas de 527 °C durante 5 seg. Lo anterior excedió los resultados de estudios anteriores.

En el Apéndice de esta ponencia se recomienda una especificación para el sellado de pavimentos de adoquines de concreto para aeronaves.

5.2 FALLA DEL PAVIMENTO DE ADOQUINES DE CONCRETO EN LUTON

Las fallas que se tuvieron en los extremos de giro de la pista del aeropuerto de Luton fueron el más grande revés sufrido por este sistema como pavimento para aeronaves. En un esfuerzo para reducir el tiempo de construcción, se adoptó en ese entonces un sistemas de colocación mecánica de adoquines de concreto, que resultó ser inadecuado para la condición cuando el empuje de los chorros de aire de las turbinas era imperante. Dichas fallas fueron analizadas en extensión en el reporte [10] producido por el Profesor John Knapton y el autor, el cual fue encargado por la CAA. La conclusión de este reporte atribuye las principales causas de esta falla a:

1. Anchos de junta anormales alrededor de los grupos de adoquines colocados mecánicamente.
2. La inclusión de áreas de concreto rígido dentro de las de pavimento de adoquines de concreto.
3. Las juntas no eran resistentes a la erosión y al ingreso de combustibles, y agua (es decir, no estaban selladas).
4. Falta de mantenimiento y de inspecciones rutinarias.

El reporte de la CAA incluye un listado completo de las situaciones en las cuales se utiliza el pavimento de adoquines de concreto como superficie de pavimento para aeronaves, examina la experiencia que se ha tenido hasta ese entonces con los pavimentos de adoquines de concreto y proporciona guías de diseño y de especificaciones. También contiene recomendaciones para diseñadores de pavimentos, contratistas, dueños, operadores y usuarios de los pavimentos para aeronaves con superficie de adoquines de concreto.

5.3 NUEVOS DESARROLLOS EN PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE CONCRETO

La mayoría de los pavimentos de adoquines de concreto utilizados para aeronaves militares, han utilizado, hasta la fecha, adoquines rectangulares o con forma de "S", los cuales se pueden colocar mecánicamente. Como se mencionó anteriormente, una de las razones por las cuales se presentó la falla en el aeropuerto de Luton fue la existencia de juntas anchas que quedaron alrededor de los grupos de adoquines que se colocaban en cada acción de la colocadora mecánica. Este problema se puede solucionar ahora mediante el uso de una forma de adoquines producida con el nombre de "XeneX". Los beneficios de este sistema se pueden resumir como sigue:

1. Excelente capacidad portante que contribuye a la resistencia global del pavimento.
2. Mayor resistencia horizontal a las fuerzas de frenado y giro.
3. Eliminación de la erosión de la arena de sello en las juntas cuando están debidamente selladas.
4. Menor dependencia de los confinamientos laterales.
5. Colocación mecanizada rápida y precisa con un solo hombre.
6. Anchos de junta consistentes en toda el área y eliminación del efecto de los grupos.
7. Reducción en los requisitos de supervisión.
8. Instalación directa, tal como se produjeron, sin la necesidad de ajustes manuales en el sitio.
9. Facilidad de instalación con todos los tipos de máquinas colocadoras manuales o mecánicas.

La forma de cruz de estos adoquines les permite trabarse entre ellos de una manera más positiva que los adoquines convencionales, y les permite resistir fuerzas horizontales y la tendencia a migrar. La forma dentada de los adoquines contribuye a que ellos mismos se autoacomoden durante la colocación y a que traben, de manera similar a engranajes. Es la opinión del autor que las características de estos adoquines los hace particularmente apropiados para resistir los severos empujes de giro impuestos por los trenes de ruedas múltiples de los grandes bombarderos, igual que los de los trenes de una sola llanta con grandes presiones de inflado de los aviones caza. Una aplicación de estos adoquines, colocados mecánicamente, se muestra en Figura 6. Proyectos realizados recientemente en Alemania y en un aeropuerto en Dinamarca han demostrado que con ellos se alcanzan ratas de colocación similares a las que se obtienen con otras formas de adoquines, utilizando tanto máquinas Probst como Optimas.

6. ESPECIFICACIONES PARA PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE CONCRETO EN AEROPUERTOS MILITARES

Es satisfactorio el informar que el uso de pavimentos de adoquines de concreto ha sido investigado, de manera independiente, por las diversas autoridades que se incluyen en la Tabla 1, quienes encontraron que era un sistema adecuado de pavimento para aeronaves militares en las áreas siguientes: Plataformas de estacionamiento de aeronaves, plataformas para helicópteros, pistas de carreteo de baja velocidad y áreas de mantenimiento de aeronaves no sometidas a excesivos empujes de los chorros de las turbinas. La Tabla brinda referencias sobre las especificaciones para pavimentos de adoquines de concreto de que dispone la mayoría de esas autoridades, además de la opinión de cada una de ellas sobre la contribución que la capa de adoquines de concreto hace al pavimento en términos de equivalencia de un espesor de superficie de concreto asfáltico.

De la Tabla 1 se puede ver que existe una gran divergencia de opinión sobre la magnitud de la contribución de la capa de adoquines de concreto a la resistencia global del pavimento. En la actualidad es esencial que se tenga una convergencia de opiniones sobre este tema con el fin de poder proveer diseños económicos para pavimentos con superficie de adoquines de concreto.

7. ANOTACIONES FINALES

Esta ponencia ha definido los beneficios de utilizar pavimentos de adoquines de concreto para aeronaves militares y se ha llamado la atención acerca de su difundida aceptación por las autoridades de aviación responsables por esos pavimentos. Existen ya nuevos agregados artificiales capaces de resistir las cargas térmicas de los chorros de las turbinas de los aviones actuales y futuros, que incidirán directamente sobre las superficies. Si fuera necesario será posible utilizar dichos materiales para fabricar adoquines de concreto resistentes a dichas temperaturas.

Se dispone ahora de una nueva forma de adoquines capaz de ser colocada mecánicamente sin el efecto de los grupos y con anchos de junta consistentes, lo que la hace especialmente adecuada para pavimentos para aeronaves.

Es la opinión del autor que todos los pavimentos de adoquines de concreto colocados en aeropuertos militares se deben sellar para prevenir la erosión de la arena de la junta y el ingreso del agua y de los combustibles a través de la superficie del pavimen-

to. Esto ha sido corroborado por todas las autoridades involucradas con los pavimentos para aeronaves militares, presentadas en la Tabla 1, quienes especifican el uso de un sellante.

Para cuando la FAA y el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos publiquen las recomendaciones de diseño después de su investigación de pavimentos en el aeropuerto internacional de Denver, será esencial que se haya alcanzado un consenso en la industria del pavimento de adoquines de concreto sobre la contribución que la superficie de adoquines de concreto, si es que alguna, hace a la resistencia total del pavimento.

8. RECONOCIMIENTOS

Al Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos y a la British Aerospace Defense Ltd.

9. APÉNDICE – ESPECIFICACIONES PARA EL SELLADO DE PAVIMENTOS DE ADOQUINES DE CONCRETO PARA AERONAVES

1. Después de la compactación final de la arena de sello, se debe barrer cuidadosamente el pavimento de adoquines de concreto para remover la arena sobrante que quede entre los biseles. Las juntas deben ser estabilizadas utilizando un sellante como el ACM Paveseel o similar, siguiendo las recomendaciones del fabricante, sobre Salud y Seguridad, para su aplicación. El sellante se debe aplicar directamente sobre la superficie de los adoquines, dejando que llene los biseles y penetre en la junta antes de retirar el material sobrante, usando un trozo de espuma de caucho como material absorvente.
2. El sellante debe ser un prepolímero líquido curable en presencia de humedad, disuelto en un solvente aromático/asfáltico con las siguientes propiedades:
   - Tiempo de curado en la superficie, no mayor de 24 h.
   - Contenido de sólidos del 20 % ± 1%.
   - Resistente a los aceite, combustible de aviación, gasolina y líquidos descongelantes.
   - La apariencia debe ser transparente o ligeramente amarilloso, como color paja y debe estar libre de materiales extraños.
   - La elongación de la película antes de reventarse debe ser del 250 %.
3. El sellante debe tener un registro comprobado de seguridad y de comportamiento en pavimentos de adoquines de concreto para aeronaves.
4. El sellante debe penetrar en las juntas a una profundidad mínima de 15 mm y debe brindar una adherencia elastomérica flexible, resistente al agua y a los combustibles.
5. Las propiedades mecánicas de la arena de sello estabilizada debe cumplir con los siguientes requisitos:
   - Se deben elaborar tres especímenes de ensayo, prismáticos, de 38 mm x 38 mm x 250 mm con la arena de sello impregnada con el sellante hasta la saturación y se remueve cualquier exceso de sellante.
   - Se ensaya cada espécimen a una edad mínima de 7 d o después de que el material haya curado completamente, el tiempo mayor de estos.
   - Cada espécimen se coloca sobre dos apoyos separados 200 mm y debe soportar una carga central de tal manera que produzca una deflección de 15 mm en 10 ocasiones consecutivas sin deterioros visibles. La carga se debe aplicar a incrementos tales que no demore más de 1 min en aplicarse. Después de esto se debe generar una deflección de 20 mm durante 1 min sin que se presenten deterioros visuales.
   - En todas las oportunidades anteriores, los especímenes deben volver a su forma original.