**SIMPOSIO INTERNACIONAL DE CONSTRUCCIONES**

**Método de evaluación de pistas aéreas ACN-PCN. Transformaciones para su implementación en Cuba**

**Transformations of the method of evaluation of air hints ACN-PCN for their implementation of Cuba**

**Autores:** **Dra. Ing. Leticia García Pérez1, Dr. Sc Gilberto J. Quevedo Sotolongo2**

1 Ingeniera Civil, Profesora e Investigadora del Centro de Investigaciones de las Estructuras y los Materiales (CIDEM), de la Facultad de Construcciones de la Universidad Central de las Villas. Cuba, [leticiagp@uclv.edu.cu](mailto:leticiagp@uclv.edu.cu)

2 Profesor Emérito de la Universidad Central de las Villas, Facultad de Construcciones. Director de la SICTE S.A de la UCLV. Cuba,[quevedo@uclv.edu.cu](mailto:quevedo@uclv.edu.cu)

**RESUMEN**

En el presente trabajo se exponen las características del método de evaluación de pistas de aeropuertos (ACN – PCN), establecido por la OACI y se hace un estudio del mismo, encaminado a plantear modificaciones necesarias para su implementación en Cuba. Las modificaciones planteadas están relacionadas con la necesidad de valorar cimentaciones no homogéneas de pistas aéreas, presentes en aeropuertos en Cuba, y la valoración de la influencia del estado tensional en la determinación del espesor equivalente (e) y el CBR promedio de dicha cimentación. Muestra comparativamente las influencias de estas modificaciones para distintos casos reales a la hora de establecer el PCN de las pistas aéreas.

**SUMMARY**

This article presents the characteristics of the method of evaluation of airports runways (ACN - PCN method) settled down by the OACI and a study of the same one is made, guided to outline necessary modifications for its implementation in Cuba. The outlined modifications are related with the necessity of valuing non homogeneous foundations of air hints, present in airports in Cuba, and the valuation of the influence of the state tensional in the determination of the equivalent thickness (e) and the CBR average of this foundation. It shows the influences of these modifications comparatively for different real cases when establishing the PCN of the air hints.

**Palabras Claves:** Método ACN – PCN, OACI, CBR, Pavimento, Evaluación de Pistas Aéreas

**Key Words:**Method ACN-PCN, ICAO, CBR, Pavement, Evaluation of Air Hints

**INTRODUCCIÓN**

Cuba es miembro de la OACI (Organización Internacional de la Aeronáutica Civil) y se inscribe en sus tratados y reglamentaciones, las cuales debe cumplir como todo país que se inscribe en la Organización. Por ello es necesario que cada aeropuerto tenga definido los diferentes tipos de aeronaves que pueden aterrizar de acuerdo al tráfico y a las características de los pavimentos que tienen, así como otras condiciones necesarias de seguridad en cuando a su capacidad resistente de la misma. Esta evaluación o caracterización de las pistas debe hacerse por el método de evaluación de pistas aeroportuarias ACN- PCN (establecido por la OACI). La Empresa Cubana de Aviación (ECASA) se ha dado la tarea de validar los aeropuertos cubanos de acuerdo a la metodología internacional establecida por la OACI para conocer los diferentes aviones que pueden realizar maniobras en cada aeropuerto de nuestro país y con qué ciclo de acuerdo a las características de cada uno entre otras cosas de sus pavimentos, que ya están construidos y además tienen diferentes capas con comportamiento variable, en algunos casos sin la documentación de las características de los mismos lo cual solo puede resultar de mediciones in situ sin poder parar el tráfico aéreo en las terminales a estudiar.

En este trabajo se exponen las características del método de evaluación de pistas de aeropuertos (ACN–PCN), establecido por la OACI. Se hace un estudio del mismo, encaminado a plantear modificaciones necesarias para su implementación en Cuba. Las modificaciones planteadas están relacionadas con la necesidad de valorar cimentaciones no homogéneas de pistas aéreas, presentes en aeropuertos en Cuba, y la valoración de la influencia del estado tensional en la determinación del espesor equivalente (e) y el CBR promedio de dicha cimentación. Muestra comparativamente las influencias de estas modificaciones para distintos casos a la hora de establecer el PCN de las pistas aéreas, instaurando finalmente un procedimiento de evaluación para pistas aéreas que incluye todos los cambios realizados al método ACN-PCN.

**MÉTODO ACN-PCN**

Como es conocido el método ACN – PCN, es el método vigente establecido por la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) para la evaluación de pistas en Aeropuertos, después de aplicado el mismo sobre un pavimento, es muy fácil determinar la aeronave crítica que afecta el pavimento de la pista, el mismo constituye una herramienta indispensable para la adecuada administración de los bienes que ellos representan.

El **ACN,** Air Craft Clasification Number (Número de clasificación aeronaves) es un número que expresa el efecto relativo de una aeronave de peso dado sobre un pavimento con una categoría del terreno de cimentación especificada.

El **PCN** Paviment Clasification Number (Número de clasificación de pavimentos) es el número que expresa la capacidad de carga de un pavimento para un número ilimitado de operaciones

(Varios PCN podrían obtenerse si la resistencia del pavimento depende de importantes variaciones estaciónales).

El número de clasificación del pavimento (PCN) indica que una aeronave cuyo número de clasificación (ACN) es menor o igual a dicho PCN podrá utilizar el pavimento únicamente sujeta a restricciones relativas a la presión de neumáticos.

El ACN se podrá obtener mediante la expresión siguiente:



Con CRSE en (Kg.). (1)

Donde: (CRSE) es la carga por rueda simple equivalente del tren de aterrizaje principal de la aeronave en cuestión (depende de la distribución de las ruedas)

(2/ 1000) Coeficiente que se seleccionó para que los ACN de la mayoría de las aeronaves queden entre 0 y 100.

El PCN para pavimentos flexibles se podrá obtener mediante la expresión:



(2)

Donde: (e) Espesor equivalente en (cm.), a partir de convertir el pavimento en un material homogéneo equivalente de E = 500 MPa.

(CBR) CBR de la cimentación en %.

**CÁLCULO DE PCN. MÉTODO TRADICIONAL ESTABLECIDO POR LA OACI**

Tomando para determinar el PCN según lo establecido por la OACI, 4 estructuras de pavimentos, Fig.1 seleccionadas de la pista de un aeropuerto seria de la siguiente forma:

8 cm.

12 cm.

7 cm.

Hormigón Asfáltico

Bese de macadam

Suelo natural areno-arcilloso A-2-6

Relleno areno-arcilloso A-6

b) Estructura de pavimento 2

Hormigón Asfáltico

Bese de macadam

Suelo natural areno-arcilloso A-2-6

10 cm.

20 cm.

a) Estructura de pavimento 1

Suelo natural A-7-6

Hormigón Asfáltico

Bese de suelo-cemento

Relleno areno-arcilloso A-6

15 cm.

5 cm.

15 cm.

c) Estructura de pavimento3

5 cm.

15 cm.

160 cm.

Hormigón Asfáltico

Bese de macadam

Capa vegetal

Relleno areno-arcilloso A-6

d) Estructura de pavimento4

Fig. 1 Estructuras de pavimento de una pista ejemplo

Las características de los materiales que componen las capas de cada estructura de pavimento aparecen en la Tabla 1

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Tabla 1 Características de los materiales componentes de las diferentes estructuras de pavimento. | | | | | | |
| Capa | c | φ | E (Mpa) | γ (KN/m3) | CBR | μ |
| A-2-6 | 20 | 37 | 37 | 17 | 20 | 0,30 |
| A-6 | 20 | 32 | 25 | 17.5 | 15 | 0,32 |
| A-7-6 | 47 | 18 | 18 | 16 | 6 | 0,37 |
| Capa. Vegetal | 8 | 5 | 4 | 14 | 3 | 0,40 |
| Asfalto | - | - | 1000 | 23 | - | 0,40 |
| Suelo cemento | - | - | 1000 | 20 | - | 0,25 |
| Macadam | - | - | 400 | 21 | - | 0,25 |

Utilizando la expresión 2 obtenemos los resultados que aparecen en la Tabla 2:

; e = Ei/500\* hi

Ei: es el módulo de cada capa componente del pavimento

hi: es el espesor de cada capa.

Para el espesor equivalente se toman las capas de superficie, base y subbase.

El CBR se toma del suelo natural que sería la cimentación.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Tabla 2 Resultados del cálculo del PCN método tradicional. | | | |
| Estructura | CBR de la  cimentación | PCN (tradicional) | Observaciones |
| 1 | 20 | 41 | Esta se adapta a las condiciones que debe tener un pavimento para aplicar el método de forma tradicional |
| Estructura 2 considerando A-6 como cimentación. | | | |
| 2 | 15 | 14 | Del otro suelo el A-2-6 se tiene en cuanta el CBR |
| Estructura 2 considerando A-2-6 como cimentación. | | | |
| 2 | 20 | 20 | El A-6, se toma en el espesor equivalente |
| Estructura 3 considerando A-7-6 como cimentación. | | | |
| 3 | 6 | 10 | Del otro suelo el A-6 se tiene en cuanta el CBR |
| Estructura 3 considerando A-6 como cimentación. | | | |
| 3 | 15 | 34 | El A-7-6, se toma en el espesor equivalente |
| Estructura 4 considerando la capa vegetal como cimentación. | | | |
| 4 | 3 | 1 | Del otro suelo el A-6 se tiene en cuanta el CBR |
| Estructura 4 considerando A-6 como cimentación. | | | |
| 4 | 15 | 10 | La capa vegetal, se toma en el espesor equivalente |

Se puede ver como en los casos, en que aparecen dos suelos, en función de si tomamos el CBR de un suelo u otro cambia notablemente el valor del PCN, cabe la duda de cuál de los dos valores de CBR tomar para un resultado más real, o si ambos trabajan de forma conjunta en la cimentación.

**MODIFICACIONES AL MÉTODO ACN-PCN. APLICACIÓN.**

A partir de tener bien interpretado el procedimiento ACN-PCN, se introducen algunas modificaciones para poder implementarlo en Cuba, ya que a la hora de determinar el espesor equivalente del pavimento, es llevado a un material homogéneo de módulo 500 Mpa, realizándose un promedio pesado en función de lo que aporta cada material del pavimento en el espesor y en su módulo, lo cual tiene lógica pero no es totalmente correcto, pues no tiene en cuenta los estados tensionales que actúan en cada material, por el ejemplo el asfalto que está en la superficie tomará más esfuerzo que el material que está debajo de él. A partir de esto se propuso una forma de determinar dicho espesor equivalente (e), como un promedio pesado en función de los espesores, los módulos y las tensiones medias actuantes en cada material, lo que hace mejorar el comportamiento, pues los materiales de mayor módulo son los que están en la superficie y son los que más tensiones toman.

 (3)

Donde: hi: Espesor de las diferentes capas.

Ei: Módulo del material de cada capa.

σzpi: Tensión media en cada capa.

σzppromedio: Promedio de las tensiones medias de cada capa.

Para el caso en que debajo del pavimento aparezcan dos suelos diferentes o más, y que estén dentro de la potencia activa, también se introducen modificaciones, determinando un CBR promedio, en función de los espesores de cada suelo, de los CBR de los mismos y de las tensiones medias actuantes en cada material, ya que el método tradicional considera un suelo homogéneo.

 (4)

Donde:

hi: espesor de la capa de cada suelo.

σzpi: tensión media en cada suelo.

CBRi: CBR de cada suelo.

**APLICACIÓN DE LAS MODIFICACIONES AL MÉTODO**

Para determinar los estados tensionales, se consideró un modelo de comportamiento lineal elástico para el asfalto caracterizado por su módulo de deformación y de poisson y un modelo eslasto plástico para los suelos, caracterizado igualmente por sus módulos de deformación y de poisson y por sus características de resistencia a cortante como valores máximos de plastificación de los mismos. Para la obtención de estos estados tensionales se utilizó el programa SIGMA, realizando una modelación por elementos finitos con la valoración correspondiente de la influencia de la densidad de la malla etc. Se muestran los resultados de uno de los ejemplos realizados donde se incluye una valoración de los cambios que ocurren en los estados tensionales cuando se consideran modelos elasto plásticos de comportamiento de los suelos con respecto a modelos simplificados donde se consideran todos los materiales con comportamiento lineal.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Tabla 3 tensiones en las diferentes capas de la estructura de pavimento seleccionada. Modelo lineal, elasto-plástico, método teórico de cálculo | | | |
| Z(m) | σzp(Kpa) lineal-elástico | σzp( Kpa) elasto-plástico | σzp( Kpa) teórico |
| 0.08 | 708.5 | 915 | 744.3 |
| 0.20 | 553.5 | **358.5** | 591.47 |
| 0.582 | 162.9 | 170 | 173.98 |
| 0.97 | 68.9 | 70.5 | 71.9 |
| 1.81 | 19.5 | 22.5 | 21.86 |
| 2.65 | 10 | 19.5 | 10.3 |

Podemos ver como con el modelo lineal, los valores de tensiones son semejantes a los del método teórico lo cual es algo lógico ya que en dicho método no se tienen en cuenta los valores de c y φ. Se observa en el modelo elasto-plástico donde comienza la plastificación (cuando comienzan los suelos), esto ocurre porque estos puntos fallan y redistribuyen los valores de tensiones para las capas superiores e inferiores.

**MEJORAMIENTO EN FUNCIÓN DE LAS TENSIONES.**

Estructura de pavimento 1.

Para este caso tomamos una aeronave cuyo valor del ACN correspondiera con el PCN que resultó del ejemplo anterior, PCN =41. Este es el caso de un A300B2 (ACN = 40), la carga que baja por cada pata 333,7 Kn. Se consideró un área circular equivalente a la de los dos neumáticos juntos. Resultando una presión de 1757.68 kPa y un diámetro equivalente = 50 cm.

Con estas tensiones se puede calcular un nuevo espesor equivalente, utilizando la expresión (3) resultando: e = 37 cm. PCN = 43

* Como se pudo demostrar el espesor equivalente aumenta tomando en cuenta las modificaciones trayendo consigo un aumento del PCN.

**MEJORAMIENTO EN FUNCIÓN DEL CBR.**

Estructura de pavimento 4

Cálculo del CBR promedio

Utilizando la expresión (4).

Suelo 1 CBR = 15 (A-6). σzp = 431,2 KPa. h =1,6cm.

Suelo 2 CBR = 3 (capa vegetal). σzp = 16,1KPa. h = 0,6m.

CBR promedio = 12,9.

PCN = 8,72

Si comparamos este valor de PCN, con el que resultó del cálculo por el método tradicional (Ejemplo 1), podemos ver que es menor. Esto indica que el suelo 2 (capa vegetal), tiene influencia también en el cálculo del CBR, y al no considerarlo esto puede falsear los resultados, por lo que podemos decir de forma general que este cambio mejora el valor del CBR de la cimentación.

En la tabla 4 aparecen para el resto de la estructuras de pavimentos el valor del PCN, considerando las modificaciones hechas a la hora de determinar el CBR:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Tabla 4 Mejoramiento del PCN en función de la no homogeneidad del suelo. | | | | |
| Estructura | CBR suelo 1 | CBR suelo 2 | CBR promedio | PCN modificado |
| 2 | 15 | 20 | 15.8 | 11,29 |
| 3 | 15 | 6 | 7.14 | 14,51 |
| 4 | 15 | 3 | 12.9 | 8,72 |

**INFLUENCIA DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL MÉTODO ACN-PCN.**

Si el valor del PCN de una pista no cumple con la condición ACN ≤ PCN, para las aeronaves más frecuentes que deben maniobrar en la pista, claro está, en dependencia también del régimen de explotación de la misma, comienzan a aparecer deterioros, que pueden ocasionar la falla. Por lo que habría que hacer un análisis de todas las variables que intervienen en la fórmula de PCN, para ver cuál es la que aumenta su valor.

**AUMENTO DEL ESPESOR DE LA CAPA DE ASFALTO, Y DEL CBR DE LA CIMENTACIÓN.**

Haciendo un análisis teórico de la influencia de las variables que intervienen en la fórmula de PCN, lo cual en la práctica debe estar compuesto por una valoración tecnica económica de la factibilidad de la implementación de dichas variaciones, las soluciones posibles para aumentar el valor del PCN de la pista pueden ser:

1. Aumentar la capa de asfalto.
2. Aumentar el CBR de la cimentación
3. Aumentando los módulos de las capas o de alguna de las capas.
4. Aumento de los espesores de las capas de base y/o sub base.

De estas, las dos primeras son las que más influyen sobre el valor del PCN, la tercera no tiene mucha influencia y sin embargo aumentar su valor puede aumentar el costo de un proyecto, para una pista ya construida. La cuarta tampoco tiene mucha influencia ya que generalmente los módulos de estas capas son más bajos que en la capa de superficie.

Para una pista ya en explotación también aumentar el CBR de la cimentación puede resultar poco económico. Habría que analizar bien en función de lo presupuesto, cual variante elegir.

**AUMENTO DEL ESPESOR DE LA CAPA DE HORMIGÓN ASFÁLTICO Y DEL CBR, PARA UNA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO COMO LA 1(MANTENIENDO LAS DEMÁS CARACTERÍSTICAS CONSTANTES)**

Utilizando las expresiones (1), (3) y (4) se obtiene los resultados que aparecen en la tabla 5

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Tabla 5 PCN para un aumento de CBR y aumento de la capa de asfalto de 4 cm. | | |
| H de asfalto cm. | CBR de la  cimentación | PCN |
| 10 | 20 | 41 |
| 14 | 61 |
| 10 | 30 | 77 |
| 14 | 80 |



Fig. 3 Gráfico 1 PCN para diferentes espesores de la capa de asfalto y para diferentes valores de CBR de la cimentación

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Tabla 6: ACN de algunas aeronaves de diferentes portes | | |
| Porte | Aeronave | ACN |
| Bajo | DC-3 | 8 |
| DC-4 | 10 |
| Fokker 50 | 11 |
| Mediano | B-720 | 29 |
| B737 | 22 |
| DC-9 | 26 |
| Gran porte | DC-10 | 59 |
| IL 62 | 47 |
| IL86 | 34 |
| B-747 | 57 |
| B-757 | 51 |

Podemos ver como aumenta el PCN para un aumento de la capa de asfalto de 4 cm. más. En este mismo ejemplo se aprecia como también en el aumento del PCN influye en gran medida el aumento del CBR de la cimentación. Para un valor de CBR de 20%, pueden operar aeronaves de mediano porte siempre que aumentemos el espesor de la capa de asfalto. Para los demás valores de CBR de la cimentación, pueden realizar operaciones aeronaves de gran porte.

Para determinar el PCN de la pista debe tomarse el menor PCN obtenido de las 4 estructuras de pavimento seleccionadas para el estudio de la pista.

**PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN DE PISTAS DE AEROPUERTOS. MÉTODO ACN- PCN**

1. Datos necesarios de la pista del aeropuerto:

* Caracterización de los materiales de la pista. De donde se pueda extraer:
* Módulos (E) de los suelos que sustentan el pavimento de la pista.
* Pesos específicos de cada uno de ellos.
* CBR.
* Resistencia a cortante de los suelos (c y φ).
* Perfil longitudinal de la pista. Calas (descripción de las capas) y geometría.
* Plano de planta de la pista.
* En caso de existir deterioros (dar identificación de zonas dañadas).

2. Cálculo del ACN:

- Conocer el régimen de explotación de la pista, para determinar cuál sería la aeronave de diseño o de cálculo y establecer una equivalencia de las demás con esta.

- Determinar el ACN en caso de que no aparezca tabulado.

3. Cálculo del PCN de la pista:

- Calcular el PCN de la pista. Introducir modificaciones.

4. Análisis de resultados.

- Comparar el valor de ACN con el PCN, verificando que se cumpla que ACN ≤ PCN, según lo establecido por la OACI

* Si no cumple la condición, analizar las posibles variantes a realizar para aumentar el valor del PCN de la pista.

**CONCLUSIONES**

* + Se logró formular el método ACN-PCN, para tomar en cuenta las tensiones debido a la carga impuesta, realizando aplicaciones, comprobándose que esto trae consigo aumentos del espesor equivalente (e) y variaciones en la determinación del CBR lo cual puede falsear los valores reales de PCN.
  + Se logró formular el método ACN-PCN, tomando también en cuanta la posibilidad de que exista no homogeneidad en los suelos de la cimentación.
  + Se realizó un análisis de todas las variables que intervienen en el método ACN-PCN (en el cálculo del PCN), y se puede concluir que las de mayor peso a la hora de aumentar el PCN son: el CBR de los suelos de cimentación y espesor de la capa de asfalto, siendo esta última la más posible aplicar en la práctica.
  + Se logró conformar una metodología de evaluación de pistas aéreas a partir del método ACN-PCN, que incluye las modificaciones en función de las tensiones debido a la carga impuesta y a la no homogeneidad de los suelos de cimentación y las variantes a realizar para aumentar el valor del PCN en una pista.
  + Con la aplicación de esta metodología de evaluación de las pistas áreas, se podrá obtener, tabulados todos los pavimentos de nuestro país, en términos de PCN, con el objetivo de determinar la aeronave critica para determinada pista, según sea el tipo de pavimento existente en la misma.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

*Estructura de pavimento 1*

1. A guide to airfield pavement design and evaluation. Property Services Agency, Dept. of the Environment, Directorate of Civil Engineering Services, Croydon, London. 1999.
2. Airfield Pavement Design. Instruction for the Structural Design and Determination of Safe Loads. Ministere des Transports, Service Technique des Bases Aérinennes. France. 1983.
3. Airport pavement design and evaluation. Federal Aviation Administration. Advisory Circular, Washington, DC. 1995.
4. International Civil Aviation Organization. Aerodrome design manual (part 3- Pavements) (2nd ed.). Mondreal: Author. 1983.
5. International Civil Aviation Organization. Aerodrome manual (part 2- physical characteristics). Mondreal: Author. 1965.
6. Ibáñez, L. O. “Análisis del comportamiento geotécnico de las cimentaciones sobre pilotes sometidas a carga axial mediante la modelación matemática.” Dr. C. Ing. Gilberto Quevedo Sotolongo, tutor --TGC. UCLV (Const). 113 pág. 2001.
7. Manual de Diseño de Aeródromos/ Doc 9157 – AN / 901, Segunda Edición, Parte 3 Pavimentos. 1983.
8. Manual de Proyectos Aeródromos/ Doc 9157 – AN / 901, Primera Edición, Parte 3 Pavimentos.1977.
9. Quevedo Sotolongo. G. J. Diseño de Cimentaciones Superficiales. Manual Del Proyectista.1994.
10. Torres Vila, J.A. Diseño de Pavimentos para Carreteras y Aeropuertos. Editorial “Félix Varela”, Tomo II. La Habana. 1986.