

# Influence of Slab Warping and Geometric Design on the International Roughness Index: A case study on the Oyon Ambo Road

Victor Andre Ariza Flores, Magister<sup>1</sup>, Jordan Jhonny Jara Alvarado, Bachiller<sup>2</sup>, Elva Graciela Cordova Gonzales, Bachiller<sup>2</sup>, Jhonny Junior Saldaña Marcas, Bachiller<sup>2</sup> and Gino Denis Prado Meneses, Magister<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Continental Perú, variza@continental.edu.pe

<sup>2</sup>Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, jordan.jara@unmsm.edu.pe, elvagraciela.cordova@unmsm.edu.pe, jhonny.saldana@unmsm.edu.pe

<sup>3</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, gprado.civil@gmail.com

*Abstract – This study delves into the relationship between the warping of concrete slabs and the geometric design of roads with the International Roughness Index (IRI), specifically within the Oyon Ambo Road project. Through a detailed analysis that incorporates advanced measurements and design evaluations, the significant contributions of slab deformations and geometric features to the perception of road surface roughness are explored. It is identified that variations in slab warping, attributed to environmental influences and vehicular loads, directly impact the increase of the IRI, affecting the quality of travel and road safety. Moreover, it highlights how the geometric configuration, including curvature, slope, and transversality, plays a crucial role in the driving experience, with direct implications for the planning and maintenance of road infrastructures.*

*This work not only provides empirical evidence on the factors influencing road roughness but also suggests design and maintenance practices to mitigate negative effects on user comfort and safety. The proposed recommendations aim to guide engineers and planners towards optimizing geometric characteristics and managing slab warping, in order to improve the longevity and functionality of roads. This comprehensive approach underscores the importance of considering both structural and geometric aspects in pavement design, contributing to the advancement of knowledge in transportation engineering and the development of better practices in the construction and maintenance of road infrastructures.*

**Keywords-** *International Roughness Index (IRI), geometric design, slab warping, pavement engineering, transportation engineering.*

# Influencia del alabeo de las losas y el diseño geométrico en el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) en la Carretera Oyón - Ambo

Victor Andre Ariza Flores, Magister<sup>1</sup>, Jordan Jhonny Jara Alvarado, Bachiller<sup>2</sup>, Elva Graciela Cordova Gonzales, Bachiller<sup>2</sup>, Jhonny Junior Saldaña Marcas, Bachiller<sup>2</sup> y Gino Denis Prado Meneses, Magister<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Continental, Perú, variza@continental.edu.pe

<sup>2</sup>Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, jordan.jara@unmsm.edu.pe, elvagraciela.cordova@unmsm.edu.pe, jhonny.saldana@unmsm.edu.pe

<sup>3</sup>Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú, gprado.civil@gmail.com

**Resumen** - Este estudio profundiza en la relación entre el alabeo de las losas de concreto y el diseño geométrico de carreteras con el Índice Internacional de Rugosidad (IRI), específicamente en el proyecto carretero Oyón-Ambo. A través de un análisis detallado que incorpora mediciones avanzadas y evaluaciones de diseño, se exploran las contribuciones significativas de las deformaciones de losas y las características geométricas en la percepción de la rugosidad de la superficie vial. Se identifica que las variaciones en el alabeo de las losas, atribuidas a influencias ambientales y cargas vehiculares, inciden directamente en el incremento del IRI, afectando la calidad del viaje y la seguridad vial. Además, se destaca cómo la configuración geométrica, incluyendo la curvatura, la pendiente, y la transversalidad, juega un papel crucial en la experiencia de conducción, con implicaciones directas en la planificación y mantenimiento de infraestructuras viales.

Este trabajo no solo aporta evidencia empírica sobre los factores que influyen en la rugosidad de las carreteras, sino que también sugiere prácticas de diseño y mantenimiento para mitigar efectos negativos en la comodidad y seguridad de los usuarios. Las recomendaciones propuestas buscan orientar a ingenieros y planificadores hacia la optimización de las características geométricas y la gestión del alabeo de las losas, con el fin de mejorar la longevidad y la funcionalidad de las carreteras. Este enfoque integral subraya la importancia de considerar tanto los aspectos estructurales como los geométricos en el diseño de pavimentos, contribuyendo al avance del conocimiento en la ingeniería de transportes y al desarrollo de mejores prácticas en la construcción y mantenimiento de infraestructuras viales.

**Palabras Clave**- Índice Internacional de Rugosidad (IRI), diseño geométrico, alabeo de losas, ingeniería de pavimentos, ingeniería de transportes.

## I. INTRODUCCIÓN

La eficiencia y seguridad de las infraestructuras de transporte son pilares fundamentales para el desarrollo socioeconómico y la calidad de vida de una sociedad.

En el Perú la provisión deficiente de los servicios de infraestructura vial es uno de los aspectos más importantes de las políticas de desarrollo, ya que, es uno de aquellos países que han orientado su crecimiento hacia el exterior [1].

El crecimiento urbano sin control, deficiencias en administración de tráfico y falta de planeamiento urbano solo ha emporado la situación, a la cual se le suma la falta de

uniformidad en la geometría de las carreteras [2]. Las condiciones locales, asignan una importancia vital en el desarrollo del país al transporte terrestre; [3] menciona que se debe garantizar cumpliendo cuatro factores esenciales: seguridad, economía, rapidez y comodidad para los diferentes actores y participantes.

Entre los diversos factores que influyen en la calidad del pavimento y, por ende, en la experiencia de conducción, el alabeo de las losas y el diseño geométrico son de particular importancia.

Las investigaciones realizadas en Bolivia durante los años 2006 a 2008 muestran que la curvatura de losas fue mayor comparada a las reportadas en otros países, esto se debió principalmente la contracción por secado, gradiente térmico, humedad e inclusive los climas de la región. Inicialmente los estudios se centraron en eliminar agrietamiento prematuro. Durante 10 años presentando porcentajes de fisuración bajo, se observó y tomó en mayor consideración que las losas comunes (2,4 a 3,0 metros) afectan la regularidad superficial y por ende el desempeño funcional del pavimento.

Esto conllevó a que en la actualidad se acepte la calidad de construcción de pavimentos con Índices Internacionales de Rugosidad (o conocido por sus siglas como IRI) máximos. El IRI se define como la relación entre la superficie del pavimento y una línea de referencia ideal, generalmente expresada en metros por kilómetro (m/km) y señala irregularidad superficial según [4]. Valores más altos de IRI indican una superficie más irregular y, por lo tanto, una menor calidad del pavimento

Adentrándonos en el tema, sabemos que el alabeo de las losas, también conocido como "bumpiness" en inglés, se refiere a las deformaciones no uniformes que se desarrollan en la superficie de un pavimento a lo largo del tiempo debido a diversos factores como la carga del tráfico, las condiciones climáticas y la calidad de los materiales. El alabeo se puede presentar en edad temprana o en periodos de tiempos mayores de acuerdo con [5]. Estas deformaciones pueden manifestarse en forma de crestas y valles, resultando en una superficie irregular que afecta negativamente la comodidad y seguridad del viaje. Por otro lado, el diseño geométrico de las carreteras abarca una serie de elementos clave que influyen en la configuración física y funcional de una vía. Esto incluye la

alineación horizontal y vertical, que se refiere a la curvatura y pendiente de la carretera, respectivamente, así como la sección transversal de la misma. El diseño geométrico de una carretera es esencial para definir su configuración tridimensional, considerando diversos factores como la funcionalidad, seguridad, comodidad, integración ambiental, estética, economía y flexibilidad. Este proceso busca satisfacer plenamente los objetivos fundamentales del proyecto, garantizando una solución final que cumpla con los estándares requeridos [6]. Para entender la influencia tomemos como ejemplo el hecho de que una curvatura excesiva o pendiente pronunciada puede exacerbar la sensación de rugosidad percibida por los conductores, mientras que una alineación suave y pendiente moderada puede contribuir a una experiencia de conducción más confortable.

Según esto, un enfoque integral que considere estos factores es esencial para el diseño, construcción y mantenimiento efectivos de las infraestructuras viales, para garantizar la seguridad y comodidad de los usuarios. En este contexto, este artículo expone el estudio de la influencia del alabeo de las losas y el diseño geométrico de las carreteras en el IRI del Proyecto realizado en la Carretera Oyón - Ambo.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio tuvo lugar en regiones de Lima y Pasco (Oyón – Daniel A. Carrión) teniendo una longitud de 7 kilómetros (km 181+000 – km 188+000) y estando a una altura aproximada de 4500m.s.n.m., teniendo geografía accidentada en una carretera de montaña que finalizaba con una elevación de 4200 m.s.n.m. Las características del clima del sector son frías, baja tasa de humedad y con una temperatura media anual de 4.4°C para el sector entre 181+000 a 204+000.

Se empleó el método de determinación del Gradiente de Pseudo-Deformación (PSG), el cual requiere contar con perfiles longitudinales que permitan identificar la curvatura existente por alabeo.

Por lo que, primero, se opta en realizar levantamientos topográficos de perfiles con una precisión de 0,1mm o por otros métodos perfilométricos cuyo nivel de precisión e información que se pueda obtener sea de alto rendimiento. Se decidió medir perfiles de varios tramos testigo en distintos horarios del mismo día para evaluar el efecto de los cambios en los gradientes térmicos, los métodos estáticos como nivelación topográfica o perfilómetros pivotantes no se emplearían; por eso se optó por un perfilómetro laser.

Este equipo utilizado para la medición de perfiles de pavimento está compuesto por un sistema láser-inercial montado en un vehículo de auscultación que permite la recolección automatizada de la información de elevación de los perfiles longitudinales del pavimento existente en los tramos testigo seleccionados para el análisis, en otras palabras, ingresa el registro de perfil de forma continua a medida que el vehículo se desplaza.

Este proceso y mediciones estuvo a cargo de la empresa ACTIVA INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN, bajo la supervisión del Ing. Orlando Rojas para la coordinación y verificación de información recolectada.

Los componentes del sistema empleado junto con sus características detalladas, entre las cuales encontramos Sistemas láser-acelerómetro, Odómetro de alta resolución, Módulo GPS, Cámara frontal, etc. Algunos de estos componentes serán mostrados en las siguientes fotografías:



Fig. 1. Vehículo de auscultación empleado para la medición de perfiles longitudinales del pavimento evaluado (19-11-22).



Fig. 2. Sistema laser – Acelerómetro instalado para la recolección del perfil longitudinal (18-11-22).



Fig. 3. Odómetro de alta resolución para medición de la distancia recorrido (19-11-22).



Fig. 4. Cámara frontal y antena del módulo DGPS para captura de coordenadas de posicionamiento global (19-11-22).

Para la medición de perfiles de pavimento, se hizo de manera continua e ininterrumpida con velocidades comprendidas entre 50 y 60 Km/hora con mediciones en

distintos horarios (4 perfiles longitudinales) en toda la extensión del tramo evaluado que eran 7 km aproximadamente.

Los perfiles medidos corresponden a líneas cuya posición es la más probable donde los neumáticos de los vehículos en ambos carriles se apoyarán (ubicadas a 0.90m y 2.70m desde el eje de la vía en cada carril)

En las fechas 18 y 19 de noviembre del 2022 con horas 05:00, 09:00 y 14:00 se realizaron las mediciones, la variación de las horas fue con el objetivo de capturar cambios en los gradientes térmicos. Para la fecha del 19 de noviembre se repitieron las mediciones con el fin de contar con mayores datos en caso se requiera descartar errores de precisión o sincronización.

Finalmente, se muestra información del tramo que se evaluó mediante una tabla.

Tabla 1 Descripción y ubicación del tramo evaluado

Ruta	Inicio	Fin	Progresiva inicio	Progresiva fin
PE-18	Dv. Cerro de Pasco	Acceso a Planta de Concreto	181+000	188+000

Posteriormente a la obtención de los perfiles, estos se procesarán utilizando software ProVAL versión 3.61 y se seleccionarán tramos testigo de forma que se puedan identificar de manera precisa la curvatura cóncava presente en las losas. Después, se recortan los perfiles medidos para extraer información netamente de las losas para determinar la influencia del alabeo, para lograrlo se aplica el Filtro de Butterworth que suaviza los perfiles crudos para identificar juntas y, por lo tanto, las losas. Una vez teniendo las losas aisladas se calcula el gradiente de pseudo-deformación por medio de la ecuación de Westergaard mostrada en [7] y reajustes por mínimos cuadrados para obtener resultados más precisos.

En relación al efecto del gradiente térmico en el IRI se propone una metodología comparativa que integra los valores derivados del Diseño Final del Proyecto con el Gradiente de Pseudo-Deformación (PSG). A su vez, es posible considerar el análisis de los perfiles teóricos de losas afectadas a través de la ecuación de Westergaard tomando en cuenta las características supuestas.

Por otra parte, para el análisis del efecto aislado del diseño geométrico en el IRI, este presentará un enfoque en los perfiles teóricos del diseño geométrico de la vía, contemplando suposiciones. Estos serán examinados utilizando la Función de Densidad Espectral de Potencia (PSD) a través del software ProVAL 3.6.1. Tras un proceso de análisis se obtendrá valores que verificarán la influencia de la geometría de la vía en el IRI del pavimento de acuerdo a los criterios de la normativa a considerar.

Para el análisis del efecto combinado del alabeo de diseño, geometría de la vía y terminado superficial, se elaboraron 4 perfiles artificiales a partir de la sumatoria del perfil teórico de diseño y las cotas de las imperfecciones superficiales aisladas

de un perfil típico de una carretera con IRI de 3m/km, ya que este es el IRI de diseño. Finalmente, al obtener los 4 perfiles superficiales se determina el cálculo del IRI admisible por diseño para tramos de 100m de longitud.

### III. RESULTADOS

#### A. Efecto aislado del alabeo de las losas en el IRI

El procesamiento de los perfiles sigue las recomendaciones, así como los procedimientos realizados en trabajos de campos anteriores, según lo descrito por [8], además de ello se contó con el uso del software ProVAL versión 3.61 desarrollado por la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA).

Como no se podía tener mediciones de diferentes épocas del año para los mismos tramos testigo, se optó por definir 12 perfiles que representan las cotas del pavimento para 4 huellas en 3 horarios definidos (05:00, 09:00 y 14:00), con temperaturas mínimas, de transición y máximas en la superficie del hormigón.

Se inició el tratamiento de los perfiles mediante el análisis de Función de Densidad Espectral de Potencia (PSD por sus siglas en inglés), el cual permite identificar longitudes de ondas iguales a la distancia entre las juntas transversales, abordando la longitud completa de la losa; así mismo, se obtienen longitudes de ondas relevantes que guardan relación con la geometría de la carretera.

En la figura 5, se muestra el análisis PSD de cuatro perfiles de huellas medidas a las 05:00 a.m. del 19 de noviembre del 2022, identificando 2 picos principales de onda a 3 metros y 18 metros aproximadamente, además hay longitudes importantes entre 15 y 20 metros. Según estas observaciones, resaltamos que la longitud de las losas produce efectos importantes sobre las ondulaciones del perfil que se produce por el alabeo de estas, asimismo, entre los 15 y 20 metros, las ondulaciones de longitudes de onda tienen un efecto incluso mayor que el alabeo en las irregularidades superficiales existentes.

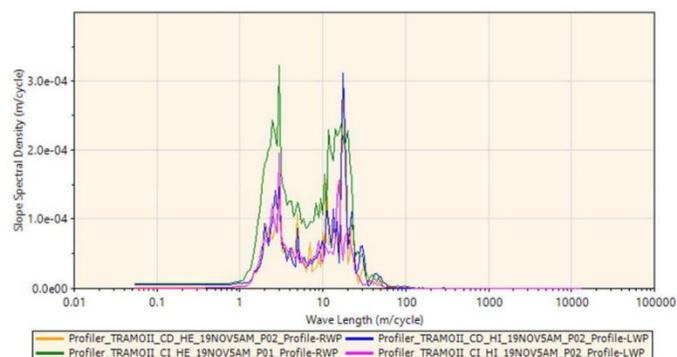


Fig. 5. Resultado del análisis PSD en cuatro perfiles del pavimento medidos el 19/11/2022 a horas 05:00 a.m.

Se seleccionaron secciones en tangente para reducir el efecto de las variaciones de la pendiente transversal en el IRI, sobreelevaciones del pavimento, transiciones de curvas verticales; así se evitó la mayor variabilidad en la distancia del vehículo al eje de la carretera en secciones de curvas pronunciadas. Se realizó un segundo filtro a las tangentes seleccionadas,

escogiendo las que presentaban menos irregularidades y que permitan identificar la curvatura cóncava de las losas sin mayores dificultades y con alta precisión. En total, se seleccionaron 64 secciones testigo de longitud, la mayoría, cerca de los 20 metros, compuestas por 6 a 7 losas.

Se procedió a identificar y aislar el perfil individual de cada losa según las recomendaciones de [8], por lo que, para que esto se lleve a cabo primero se debió identificar la ubicación de las juntas transversales. Para ello, se utilizó el Filtro de Butterworth, para eliminar las longitudes de ondas largas y obtener un perfil limpio y que permita el reconocimiento sencillo de las juntas de forma visual. Posteriormente se desplazaron los perfiles individuales de tal manera que el centro de las losas se ubique en la abscisa cero, además se eliminó las inclinaciones que estos presentaban inicialmente, asegurando de esta manera, que las medias de las cotas de las losas tienda a cero. El proceso de corrección de inclinaciones solo es aplicable a perfiles medidos a las 05:00 y 14:00, por otro lado, en el caso de los perfiles medidos a las 09:00 no es necesario realizar esta corrección debido a que se trata de un horario y temperatura intermedia. El proceso mencionado en este párrafo se conoce como normalización y es mostrado en la figura 6.

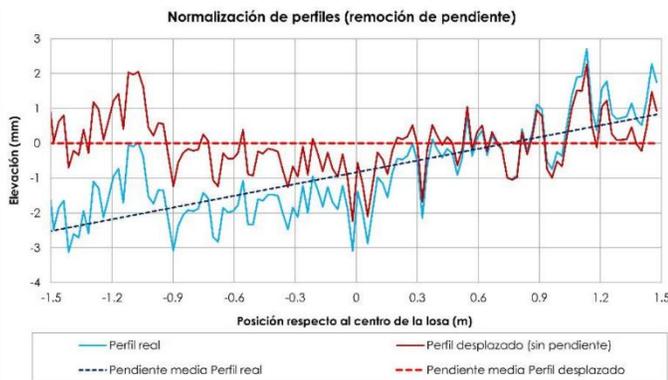


Fig. 6. Normalización de perfiles individuales de cada losa.

Para obtener el gradiente de pseudo-deformación de losas de los tramos testigo, se aplicó reajuste por mínimos cuadrados de los perfiles de deflexiones teóricas de Westergaard que mejor se ajustan a los perfiles medidos en campo, para esto se utilizó un algoritmo iterativo programado por computadora buscando el menor ajuste del error cuadrático del perfil real de la losa y las deflexiones calculadas por la ecuación de Westergaard. Los parámetros que intervinieron en este proceso fueron: el espesor de la losa, módulo de elasticidad del hormigón y el módulo de reacción efectivo de la subrasante.

El proceso de retro cálculo utilizado permitió entonces obtener los valores de contracción unitaria por cm de espesor de cada losa evaluada en los horarios de temperaturas mínimas y máximas, con lo que se obtuvo el promedio del Gradiente de Pseudo-Deformación de cada sección testigo. De igual manera, los perfiles de las secciones testigo sirvieron para calcular el IRI, apoyándonos del software ProVAL 3.61, y con ello e información del valor promedio del Gradiente de Pseudo-Deformación se elaboró el diagrama RoCK, así como los valores de Rzc (rugosidad para el caso hipotético de no existir

alabeo) y Rbtc (contribución de la curvatura de las losas en el valor total de la rugosidad). El diagrama RoCK y los valores mencionados se muestran en la figura 7 y tabla 2, respectivamente.

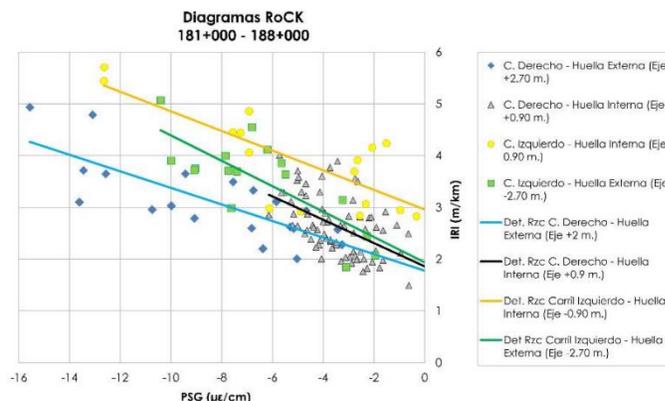


Fig. 7. Diagramas RoCK obtenidos para las huellas evaluadas en base a valores PSG e IRI para cada sección testigo.

Tabla 2. Valores promedio de Rbtc y Rzc obtenidos para los cuatro ejes evaluados

Eje	Promedio Rbtc (m/km)	Promedio Rzc (m/km)
Carril Derecho – Huella externa (+2.70m)	1.34	1.78
Carril Derecho – Huella interna (+0.90m)	0.79	1.86
Carril Izquierdo – Huella externa (-0.90m)	0.95	2.96
Carril Izquierdo – Huella interna (-2.70m)	1.59	1.94

### B. Efecto del gradiente térmico de diseño en el IRI

El presente estudio tomó en cuenta el efecto del gradiente térmico de  $-40^{\circ}\text{C}$  que considera efectos permanentes como transitorios que podrían afectar la curvatura de las losas de hormigón. Asimismo, se realizó la comparación entre el valor del gradiente térmico asumido en el diseño final del proyecto y los valores obtenidos entre el Gradiente de Pseudo-Deformación (PSG), notándose un cambio de  $-17.3 (\mu\epsilon/\text{cm})$  a  $-15.5 (\mu\epsilon/\text{cm})$  posterior al retro cálculo mientras que los valores promedios obtenidos para las secciones de testigo se encuentran en un rango de  $-4$  a  $-8 (\mu\epsilon/\text{cm})$ . A raíz de ello, se verifica que los valores de deformación de la curvatura de las losas del tramo evaluado son inferiores a los supuestos para la verificación del diseño estructural del pavimento.

Por otro lado, luego de generar un perfil idealizado compuesto por varias losas afectadas por el gradiente térmico es posible obtener el perfil teórico para losas internas (ancho 2.0m) mediante la ecuación de la deflexión de Westergaard,

para una serie de losas con un espesor de losas (25cm) Módulo de Elasticidad del hormigón (4017000 lb/pulg<sup>2</sup>) Módulo de Reacción Efectivo de la subrasante k (220 lb/pulg<sup>3</sup>) y Coeficiente de Poisson del hormigón (0.15). De igual forma, se replicó el proceso para el perfil teórico alabeado de las losas externas (ancho mayor a 2.5m).



Fig. 8. Deflexión teórica de una losa sometida a un diferencial de temperatura de -40°C empleando la ecuación de Westergaard.



Fig. 9. Perfil teórico de una serie de losas alabeadas sometido a un diferencial de temperatura de -40°C.

Para determinar el valor del Índice Internacional de Rugosidad (IRI) asociado al efecto teórico del alabeo en las losas, se desarrollaron dos perfiles compuestos, cada uno por 33 losas con una extensión total de 99 metros. A partir de este análisis, se constató que el valor de IRI para un perfil teórico, influenciado por un diferencial de temperatura de diseño de -40°C, alcanza los 2.7 m/km en las losas internas y los 4.5 m/km en las losas externas.

### C. Efecto aislado del diseño geométrico en el IRI

Con respecto al análisis de los perfiles de diseño geométrico utilizando la versión 3.61 del software ProVAL, se consideraron a diferencia del efecto de alabeo, unas cotas ideales asumiendo superficies sin desviaciones constructivas.

Se analizaron cuatro perfiles representativos a lo largo del tramo completo, los cuales corresponden a las huellas medias estimadas para las ruedas externas e internas. Estos perfiles se calcularon a distancias de 0.90 m y 2.70 m desde el eje central de cada carril, utilizando como base los modelos digitales de diseño del proyecto. En el siguiente gráfico se muestran los

perfiles teóricos de las 4 huellas analizadas a través de Función de Densidad Espectral de Potencia (PSD).

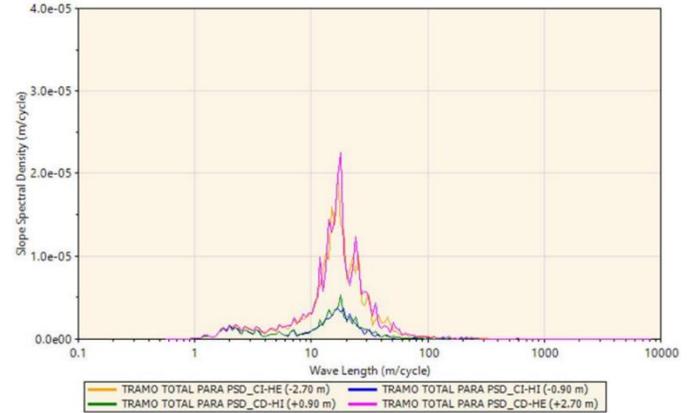


Fig. 10. Resultado del análisis de Densidad Espectral de Potencia (PSD) mediante el software ProVAL 3.6.1 para los 4 perfiles teóricos del Diseño Geométrico de la Vía.

Asimismo, tras una serie de evaluaciones, se calculó el IRI teórico generado por el efecto de la geometría de la vía por cada 100 m del tramo. Los resultados obtenidos se sistematizaron y discutieron en la tabla subsiguiente, proporcionando una visión cuantitativa del IRI generado por la geometría de la vía.

Tabla 3  
Resumen estadístico de resultados del IRI generado por geometría de la vía

Valores Promedio de IRI por geometría (m/km)			
CI-HE (-2.70m)	CI-HI (-0.90m)	CD-HI(+0.90m)	CD-HE (+2.70m)
0.74	0.55	0.55	0.78

Continuando con el proceso, se observó que los valores de IRI superaban en diversos segmentos la normativa estipulada, excediendo el umbral de 0.5 m/km. Según la tabla adjunta, se indica que más del 80% de la longitud de las huellas externas y más del 50% de la longitud de las huellas internas superan el límite establecido.

Tabla 4  
Resumen estadístico del IRI generado por geometría de la vía. Sectores con índices mayores y menores a 0.5 m/km

Indicador	CI-HE (-2.70m)	CI-HI (-0.90m)	CD-HI (+0.90m)	CD-HE (+2.70m)
>0.5 m/km	79.2%	58.3%	58.3%	81.9%
< 0.5m/km	20.8%	41.7%	41.7%	18.1%

Los análisis exhaustivos realizados revelan que la geometría de la vía ejerce una influencia significativa en el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) a lo largo de la mayoría del tramo evaluado, así como en los cuatro ejes examinados. En consecuencia, se concluye que los sectores impactados deben ser considerados como singularidades, dado que las distorsiones observadas en el perfil longitudinal no pueden ser atribuidas a las prácticas constructivas empleadas por el contratista.

*D. Necesidad de definición del IRI admisible considerando el efecto combinado de alabeo de diseño, geometría de la vía y terminado superficial.*

Los IRI obtenidos en análisis anteriores no pueden sumarse o restarse para obtener un IRI global, ya que cada valor se determina según un perfil específico y no permite evaluar el efecto combinado de los factores en estudio. Por lo que, se generaron perfiles artificiales de losas alabeadas a gradiente térmica de  $-40^{\circ}\text{C}$ , tomando en consideración las cotas del diseño geométrico para las 4 huellas establecidas, además de las imperfecciones superficiales. Según la teoría de [9], los perfiles de carretera pueden formularse como espectros de longitudes de ondas sinusales, por lo que se pueden descomponer en series de sinusoides sumados corresponden al mismo espectro; además de ello [10] respalda que el perfil real es la suma del perfil teórico de losas alabeadas más los efectos de la geometría de la vía y las imperfecciones de la misma; por lo que es válido que realicemos el sumar las cotas de los perfiles del diseño geométrico teórico con la superficie de cada losa que haya sido alabeada bajo el efecto de gradiente térmica de  $-40^{\circ}\text{C}$ . El valor de IRI admisible de la obra es de 3m/km por lo que para obtener un perfil que represente de mejor manera el diseño, se sumará el perfil teórico de diseño y las cotas de las imperfecciones superficiales aisladas de un perfil típico de una carretera con IRI de 3m/km. Este proceso puede ser apreciado en la figura 11.

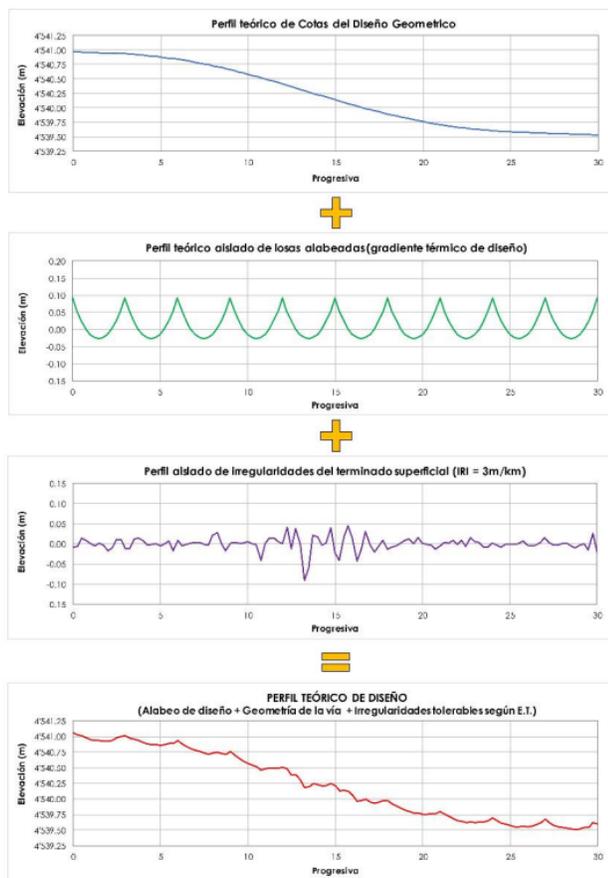


Fig. 11. Ejemplo de concepto de superposición de ondas empleado para la generación de perfiles artificiales admisibles de diseño considerando el efecto combinado del alabeo de losas, geometría de la vía irregularidades del terminado superficial.

Tras obtenerse los 4 perfiles artificiales, se realizó el cálculo del IRI admisible por diseño para tramos de 100m de longitud, destacando que, en las huellas externas, la mayoría de los resultados de los IRI son inferiores a los IRI admisibles de diseño para tramos de 100m para ambos carriles de la carretera, pero en el sector de 181+100 a 182+600, los valores son superiores a los de diseño. En cuanto al perfil del carril derecho-huella interna, se cumple que los valores de los IRI en su mayoría son menores a los de diseño, excepto los sectores entre 181+100 a 182+700 y 184+600 a 185+600, siendo en esta sección que los valores son algo mayores al IRI calculado. Finalmente, en el carril izquierdo-huella interna se presentan las mayores irregularidades producidas por la acción de la pavimentadora al extender el hormigón junto a una faja preexistente, además en este perfil la gran parte de los valores del IRI exceden al IRI admisible de diseño calculado, siendo el sector comprendido entre 185+100 a 186+100 donde no se presenta esta condición,

IV. DISCUSIÓN

Por una parte, producto del análisis de los diagramas RoCK y el efecto aislado del alabeo en el IRI, se puede mostrar que existe tendencia en que los mayores valores de IRI corresponden a gradientes de pseudo-deformación mayores, estableciéndose influencia del alabeo cóncavo de las losas en la regularidad superficial y los niveles de confort representados por el IRI. En cuanto a los ejes ubicados a +2.70m, +0.90m y -2.70m, se tiene que los valores de Rzc (cuando el valor PSG es igual a cero) convergen en el rango de 1.78 m/km a 1.94 m/km lo que es atribuible a que no se presenta alabeo por prácticas constructivas del contratista. En cambio, en el eje ubicado a -0.90m se presenta mayor valor de Rzc, que es notablemente mayor a los resultados de los demás ejes; lo que puede ser efecto de la acción de la pavimentadora al copiar un perfil longitudinal al momento de extender el hormigón junto a una faja preexistente. Asimismo, de la tabla 2 se puede apreciar que el IRI generado por la curvatura de las losas (Rbtc) es mayor en las franjas externas (-2.70m y +2.70m), por lo que en estas recae entre el 42% y 45% de dicho parámetro; por otro lado, en las fajas internas (-0.90m y +0.90m) se encuentra entre el 24% y 30% del IRI total, este efecto se debe a que las losas internas presentan un mayor confinamiento que las losas externas por lo que se encuentran con mayores restricciones para contraerse y expandirse. Otros resultados del análisis de PSG se muestran en la tabla 4, de donde podemos destacar que los valores de este parámetro son mayores en horarios matutinos (05:00 a.m.) comparados con mayor temperatura alcanzada en la capa superficial del hormigón, producto de que la radiación solar disminuye el alabeo debido a gradientes térmicos, mas no elimina la curvatura por contracción del secado.

En las tablas 5 y 6 podemos encontrar los PSG e IRI promedio de secciones testigo, de estas podemos destacar que existe una notoria reducción de la curvatura más acentuada en horarios de mayor temperatura, esta diferencia se puede explicar por diferencias de calidad del hormigón por proceso constructivo.

VALORES PROMEDIO DEL PSG PARA LOS PERFILES DE LAS SECCIONES TESTIGO EN 2 HORARIOS PARA LAS 4 HUELLAS

Horario de medición del perfil	PSG promedio ( $\mu\text{e}/\text{cm}$ ) de secciones testigo (tangentes)			
	Carril Izquierdo		Carril Derecho	
	HE (-2.70m)	HI (-0.90m)	HI (-0.90m)	HE (-2.70m)
05:00 Hrs	-6.7775	-5.24125	3.8665	-9.491
14:00 Hrs	-6.1875	-4.76.75	-3.0939	-7.268
% reducción	8.7%	9.1%	20.0%	23.4%

VALORES PROMEDIO DEL IRI PARA LOS PERFILES DE LAS SECCIONES TESTIGO EN 2 HORARIOS PARA LAS 4 HUELLAS

Horario de medición del perfil	IRI Promedio (m/km) de secciones testigo			
	Carril Izquierdo		Carril Derecho	
	HE (-2.70m)	HI (-0.90m)	HI (-0.90m)	HE (-2.70m)
05:00 Hrs	3.73	3.92	2.74	3.22
14:00 Hrs	3.33	3.90	2.55	3.01
Promedio	3.72		2.88	
% reducción	5.6%		6.7%	

Se presentan los valores promedio de Rbtc y Rzc en los cuatros ejes evaluados en la tabla 2, donde el valor de Rzc de 2.96 del carril izquierdo de la huella interna (-0.90m) difiere de los demás considerablemente por efecto de vaciado por carriles en la construcción, lo que se traduce en mayores irregularidades en la superficie del hormigón preexistente. Finalmente, este análisis permite deducir que el alabeo es en promedio 1.47 m/km para las losas externas y 0.82 m/km para las losas internas, debido a que estas últimas tienen menor área expuestas y que están confinadas por sus cuatro lados produciéndose menor deflexión.

En cuanto al estudio el impacto de un gradiente térmico se observó que un perfil teórico influenciado por este diferencial térmico de  $-40^{\circ}\text{C}$  genera valores de IRI de 2.7 m/km para las losas internas y 4.25 m/km para las losas externas. Esta discrepancia en los valores de IRI se atribuye a las diferencias en las deflexiones calculadas entre las áreas, siendo más pronunciadas en las losas externas. Por lo tanto, el estudio estima que el 90% del valor máximo permitido por las especificaciones técnicas para irregularidades superficiales queda dentro de un margen muy ajustado, lo que subraya la importancia de considerar estas variaciones térmicas en la fase de diseño para asegurar la conformidad con los estándares de calidad de la superficie de rodadura.

Del análisis de los perfiles longitudinales teóricos del diseño geométrico de una carretera se definió un rango de longitudes de onda comprendidas entre 15 a 30 metros. Los resultados corroboraron la influencia sustancial de estas longitudes de onda en las irregularidades superficiales, conforme a las predicciones del modelo matemático del IRI. Se constató que las variaciones de cota en el diseño geométrico tienen un impacto más pronunciado en las huellas externas, elevando significativamente el IRI. En contraste, las huellas

internas presentaron un impacto menor, aunque aún notable, en el rango de 15 a 25 metros.

El valor promedio general resultó 0.65 m/km, este valor representa el efecto que el diseño geométrico de la vía tiene en el IRI para el tramo estudiado. Sin embargo, es crucial señalar que, según normativas técnicas internacionales, los valores de IRI superiores a 0.5 m/km no son recomendables para la evaluación funcional del pavimento. En este estudio, el 81% de los valores de IRI medidos en las huellas internas y el 58% en las externas excedieron el umbral establecido, poniendo de manifiesto la necesidad de una revisión en el proceso de diseño geométrico para cumplir con los estándares de calidad vial. Considerando el efecto combinado de alabeo y geometría de la vía se aprecia que, en promedio, los IRI pueden diseñar, en las huellas internas alcanzan los 4.08 m/km y en las externas los 5.38 m/km, por lo que ambos valores exceden notablemente al IRI del proyecto de 3 m/km, por lo que no se puede alcanzar dicho valor por más que sean óptimas tanto la geometría como las cotas. Se tiene entonces, de la comparación de valores de IRI calculados cada 100 metros para los perfiles reales medidos en campo, que las huellas externas en el 79% (huella externa izquierda) y 83% (huella externa derecha) cumplen con el valor máximo admisible calculado, las huellas internas satisfacen la condición en el 67% y 25% de la carril derecho e izquierdo, respectivamente.

Esta investigación solo consignó los aspectos vinculados a alabeo y diseño geométrico, aspectos que no contemplan la dificultad del proceso constructivo en obras de estas características y que pueden afectar la medición del IRI más aún por las restricciones constructivas de dicha carretera [11] [12].

## V. CONCLUSIONES

El estudio de los perfiles longitudinales tuvo lugar en la carretera Oyón – Ambo, tramo II: Desvío Cerro de Pasco (km 181+000) – Dv. Chacayán (km 230+000) y comprendió 7 km de la misma (desde el km 181+000 hasta el 188+000) con altitudes máximas de 4500 m.s.n.m.

A raíz del análisis de los perfiles teóricos de las losas alabeadas y los perfiles generados por el diseño geométrico del trazo de vía se presentaron algunas conclusiones a considerarse en el diseño estructural del pavimento.

En relación con el alabeo de las losas se aseveró la existencia de una curvatura cóncava en la superficie de las losas a partir de la aplicación de la Densidad Espectral de Potencia (PSD). Tras el cálculo de deflexiones teóricas mediante la ecuación de Westergaard se retrocalculó el valor de un Gradiente de Pseudo-Deformación (PSG), con los datos obtenidos se confirmó que el efecto de radiación solar resulta en una reducción del alabeo cóncavo durante el día debido a gradientes térmicos. Asimismo, se verificó que los resultados obtenidos para el PSG se encuentran dentro de los rangos esperados para el tipo de obra, clima y ubicación geográfica donde se realiza el proyecto.

La contribución del alabeo de las losas en el valor total de la rugosidad, se calculó en promedio, como 1.47 m/km para las losas externas y 0.87 m/km para las losas internas, por lo que se denota que el aporte es menor en estas últimas debido a que su área de exposición es menos y están confinadas por sus cuatro lados. En tanto al IRI por terminado superficial, para el supuesto

caso de no existir alabeo, los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos normales en comparación a otros proyectos.

El estudio sobre el efecto de un gradiente térmico de  $-40^{\circ}\text{C}$  indicó valores de IRI de 2.7 m/km para losas internas y 4.25 m/km para externas, atribuyendo la variación a mayores deflexiones en las losas externas. Se subraya que el 90% del valor máximo aceptable según especificaciones técnicas se ve afectado por estrechos márgenes, destacando la importancia de considerar estas variaciones térmicas en el diseño para asegurar la calidad de la superficie de rodadura.

El análisis del diseño geométrico de carreteras indicó que variaciones de 15 a 30 metros en el diseño elevan el IRI medio a 0.65 m/km, superando los límites recomendados de 0.5 m/km en la mayoría de las huellas, lo que destaca la necesidad de optimizar el diseño para mejorar la calidad de la superficie vial.

El efecto combinado del alabeo de losas y la geometría de la vía sobre el IRI denota que los valores obtenidos tanto para huellas internas como externas (4.08 m/km y 5.38 m/km) sobrepasan el valor de diseño de 3 m/km; verificándose entonces que no es posible alcanzar dicho valor en la mayor parte del tramo a pesar de que las cotas del diseño geométrico sean como son planteadas en el diseño.

Finalmente, se determina en próximas investigaciones sobre la aplicación de medidas correctivas, como el cepillado de la superficie, para los sectores que no cumplen el valor máximo admisible del IRI calculado.

#### AGRADECIMIENTOS

Este artículo no hubiera sido posible sin la valiosa contribución de MECANICISTA LTDA, una firma líder en Ingeniería de Pavimentos, así como en la Auscultación y Evaluación Estructural y Funcional de Firmes. Expresamos nuestro sincero agradecimiento al equipo profesional detrás del proyecto de la Carretera Oyón – Ambo, cuyo informe técnico, titulado “Influencia del alabeo de las losas y el diseño geométrico en el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) en el proyecto: Carretera Oyón – Ambo, Tramo II: Desvío Cerro de Pasco (km 181+000) – desvío Chacayán (km 230+000), Sector: km 181+000 – km 188+000”, ha sido instrumental en la realización de este estudio. Su dedicación y meticuloso trabajo han proporcionado una base indispensable para nuestra investigación.

#### REFERENCIAS

- [1] M. Del Valle, X. La Rosa, M. Silvera, F. Campos, M. Silvera, y D. Palacios-Alonso, “Vehicular Conflict Assessment on a Road with Lane Reduction Using the SSAM Methodology”, en *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2023. doi: 10.18687/LACCEI2023.1.1.499.
- [2] C. V. Neicer *et al.*, “Influencia del PMBOK en la optimización de presupuestos en proyectos de infraestructura vial en Lima”, en *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2023. doi: 10.18687/laccei2023.1.1.1342.
- [3] C. Lopez, “Influencia del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) en el compartamiento funcional y toma de decisiones de gestión vial en

- [4] B. E. Oblitas Gastelo, I. I. Medina Cardozo, y C. R. Paredes Asalde, “International Evenness Index and Pavement Condition Index for Defining Pavement Serviceability Levels”, *ITECKNE*, vol. 18, núm. 2, abr. 2021, doi: 10.15332/iteckne.v18i2.2616.
- [5] National Ready Mixed Concrete Association, “CIP 19 Alabeo de losas de concreto”. [En línea]. Disponible en: [www.nrmca.org](http://www.nrmca.org).
- [6] A. García, A. M. Pérez Zuriaga, y Fco. Camacho Torregosa, “Introducción al Diseño Geométrico de Carreteras: Concepción y Planteamiento”, 2012.
- [7] H. Westergaard, “Computation of stresses in concrete roads”, *Highway Research Board Proceedings*, pp. 90–112, 1926.
- [8] M. Ruiz, “Desempeño del Pavimento del tramo Ancaravi - Huachacalla”, 2006.
- [9] M. W. Sayers y S. M. Karamihas, “The Little Book of Profiling”, 1998.
- [10] H. Lee, S. Haider, K. Chatti, y N. Buch, “Effect PCC Slab Curling and Warping on Pavement Roughness”, *International Society for Concrete Pavements, Inc.*, ene. 2020, pp. 228–236. doi: 10.33593/88enhr0e.
- [11] V. A. A. Flores and R. Salvador, "Adaptive Risk Management in Road Construction: Oyon-Ambo Highway Insights, El Niño 2019 Case Study," in *E3S Web of Conferences*, vol. 497, p. 02020, 2024, EDP Sciences.
- [12] V. A. A. Flores and E. Portocarrero, "Integrating Resilience in Construction Risk Management: A Case Study on Peruvian Road Infrastructure," in *E3S Web of Conferences*, vol. 497, p. 02019, 2024, EDP Sciences.