

IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables  
Santander, Junio 2017  
E.Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (Eds.)  
CIMNE, Barcelona, 2017

## METODOLOGÍA INTEGRADA PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS EN LA RED DE CARRETERAS DE GIPUZKOA

J. Corominas<sup>1</sup>, O. Mavrouli<sup>2</sup>, Iñaki Ibarbia<sup>3</sup>, Ioseba Jugo<sup>3</sup>, Nahikari Alonso<sup>4</sup>, Jon Ruiz<sup>4</sup>, Susana Luzuriaga<sup>5</sup> y J.A. Navarro<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Departamento Ingeniería Civil y Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona

<sup>2</sup> University of Twente, Enschede, Holanda

<sup>3</sup> Ikerlur, S.L., Donostia

<sup>4</sup> LKS Ingeniería, S. Coop., Arrasate/Mondragon

<sup>5</sup> Diputación Foral de Gipuzkoa-Gipuzkoako Foru Aldundia, Donostia/San Sebastián

### RESUMEN

*Se presenta una metodología de carácter integrador para evaluar el nivel de riesgo de fallo o rotura en estructuras y taludes anclados, terraplenes, desprendimientos en laderas y desmontes, corrientes de derrubios y deslizamientos que ha sido aplicada a la Red de Carreteras de Gipuzkoa. En la presente comunicación se proporcionan los detalles del cálculo del riesgo para desprendimientos rocosos y estructuras de contención ancladas.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Esta metodología tiene como objetivo comparar los niveles de riesgo asociados a elementos dispares como obras de fábrica, estructuras de contención, terraplenes desmontes y laderas naturales mediante un único criterio de evaluación. Consiste en la **evaluación cuantitativa del riesgo (ECR)** en términos de probabilidad de fallo/rotura y sus consecuencias (Fell et al. 2005), en **Puntos de Riesgo (PdR)** seleccionados, localizados en la red de carreteras gestionada por la Diputación Foral de Gipuzkoa.

La **Probabilidad anual de rotura (Pr)** se determina a partir de la frecuencia observada en registros históricos o, alternativamente, a partir de un criterio experto (probabilidad subjetiva) basado en la valoración de los factores que intervienen en la rotura. La **Pr** se determina para cada rango de magnitud considerada y varía según el tipo de fallo. El valor de **Pr** varía entre 0 y 1. Si el número de eventos por año (por ejemplo, desprendimientos rocosos) en un **PdR**, es superior a 1, entonces se trabaja con la frecuencia anual. Cada mecanismo de rotura y magnitud genera un nivel de severidad (intensidad) específico.

Las consecuencias se expresan en **unidades de coste (UC)** normalizadas, para todas las situaciones. El **coste total** es la suma del coste directo y del indirecto. Es función de la severidad de los daños y el número y valor de elementos y servicios afectados. Por este motivo, no se establece un límite superior. El **riesgo total** (pérdidas anualizadas) se obtiene de la suma del producto de la **Pr** (o frecuencia anual) para cada magnitud dada y las consecuencias (coste asociado). Se expresa de la forma siguiente:

$$R_T = \sum_{j=1}^J Pr \cdot C$$

Siendo,

$R_T$ , el Riesgo total anualizado (unidades de coste/año)

$Pr$ , la probabilidad anual de ocurrencia de una rotura/fallo de magnitud  $j$ . Probabilidad que una ladera, desmorte, muro o relleno, de unas determinadas dimensiones, pueda romper. En deslizamientos latentes, la probabilidad de una reactivación brusca.

$C$ , las consecuencias (unidades de coste) de la rotura/fallo de magnitud  $j$ . Se consideran tanto las directas (limpieza, saneo, estabilización/contención, reposición calzada) como las indirectas por bloqueo de la vía (desvío, afecciones a servicios, aislamiento de población).

Costes indirectos por bloqueo de la vía, vienen dados por la siguiente expresión:

$$C_I = T \cdot (IMD \cdot SD + FA) + IS$$

Siendo:

$T$ : tiempo de bloqueo de la vía (días);  $IMD$ : intensidad media diaria de vehículos

$SD$ : sobrecoste por desvío;  $FA$ : coste por aislamiento de población

$IS$ : coste por interrupción de otros servicios (electricidad, gas, FFCC, ...)

$$SD = \frac{t \cdot s + km \cdot c + p}{UC}$$

donde

$t$ : exceso de tiempo del recorrido por la vía alternativa (h);  $s$ : coste hora trabajo (€/h)

$km$ : exceso de longitud de recorrido por la vía alternativa (km)

$c$ : coste carburante (€/km) + peajes: (€)

$UC$ : unidad de coste, utilizada para normalizar los resultados

Si en un mismo **PdR** coexisten más de un peligro, el riesgo debido a cada uno de ellos se calcula por separado y se suma.

## 2. TIPOS DE PELIGROS CONSIDERADOS

En las Tablas 1 y 2, se detallan los distintos peligros considerados en los **PdR** de la Red de Carreteras de la Diputación Foral de Gipuzkoa.y los criterios de evaluación de daños

| Notación | Mecanismo  | Consecuencia más frecuente                       |
|----------|--|--|
| DR       | Desprendimiento de rocas                         | Invasión calzada                                 |
| CD       | Corriente de derrubios                           | Invasión calzada                                 |
| EC       | Fallo de estructura de contención/ sostenimiento | Rotura de la estructura e invasión de la calzada |
| RL       | Rotura frágil (ladera)                           | Invasión de la calzada                           |
| RP       | Rotura frágil (plataforma)                       | Rotura de la calzada                             |
| TP       | Rotura relleno                                   | Rotura de la calzada                             |
| CT       | Consolidación relleno                            | Asientos - Deformación calzada                   |
| DL       | Deslizamiento lento                              | Deformación y/o rotura de la calzada             |
| MC       | Rotura Muro de costa                             | Deformación y/o rotura de la calzada             |

Tabla 1. Mecanismos de rotura considerados y consecuencias más frecuentes

| Notación | Descriptor de intensidad     | Daño directo   | Evaluación                                     |
|----------|------------------------------|--|--|
| DR       | Volumen                      | Retirada detrito, saneo, estabilización                                | CU / m <sup>3</sup>                            |
| CD       | Volumen                      | Retirada detrito, saneo, estabilización                                | CU / m <sup>3</sup>                            |
| EC       | Volumen                      | Retirada detrito, saneo, estabilización                                | CU / m <sup>3</sup>                            |
| RL       | Volumen                      | Retirada detrito, saneo, reparación/reconstrucción                     | CU / m <sup>3</sup><br>CU x longitud del tramo |
| RP       | Volumen                      | Retirada detrito, saneo, estabilización                                | CU / m <sup>3</sup> y/o longitud del tramo     |
| TP       | Despl. vertical (velocidad)  | Rotura calzada, reposición, estabilización                             | CU x longitud del tramo                        |
| CT       | Despl. vertical (velocidad)) | rotura calzada, reposición   | CU x longitud del tramo                        |
| DL       | Asiento                      | Asiento - Deformación calzada  | CU x longitud del tramo                        |
| MC       | Despl. vertical (velocidad)  | Rotura y/o deformación de la calzada, su reposición y retirada detrito | CU x longitud del tramo                        |

Tabla 2. Mecanismos de rotura descriptor de intensidad y criterio de valoración de daños. CU: coste unitario

Cuando el talud dispone de elementos de estabilización (malla y/o hormigón proyectado) y contención (bulones, anclajes), así como de protección (pantallas y galerías) en toda su extensión, a criterio del usuario, puede plantearse la minoración de la frecuencia anual de caídas. La minoración se establece de la manera siguiente:

$$F_{rc} = \frac{F_r}{10^n}$$

Donde,

$F_{rc}$  es la frecuencia anual de desprendimientos corregida

$F_r$  es la frecuencia anual de desprendimientos obtenida a partir del inventario de eventos

$n$  es el factor de corrección de las tablas 5 y 6

| Elemento   | Factor de Reducción de la probabilidad de ocurrencia ( $10^n$ ) |      |      |        |           |        |
|--|---|------|------|--------|-----------|--------|
|  | <1  | 1-5  | 5-50 | 50-500 | 500-5.000 | >5.000 |
| Clase de magnitud                                  | <1  | 1-5  | 5-50 | 50-500 | 500-5.000 | >5.000 |
| Gunita/ bulones eficaces y extensos                | 0,50  | 0,25 | 0    | 0      | 0         | 0      |
| Gunita o bulones parcialmente                      | 0,25  | 0,10 | 0    | 0      | 0         | 0      |
| Muro de recalce/ bulonado                          | 1,0   | 0,50 | 0    | 0      | 0         | 0      |
| Malla de cable                                     | 0,25  | 0    | 0    | 0      | 0         | 0      |
| Malla triple torsión                               | 0,50  | 0    | 0    | 0      | 0         | 0      |
| Malla de alambre romboidal de alto limite elástico | 1,0   | 1,0  | 0,5  | 0      | 0         | 0      |

Tabla 5. Factor de corrección (n) para el cálculo de frecuencia anual de desprendimientos en taludes/desmontes tratados elementos de contención

| Elemento                      | Factor de Reducción de la probabilidad de ocurrencia ( $10^n$ ) |      |      |        |           |        |
|-------------------------------|---|------|------|--------|-----------|--------|
|                               | <1  | 1-5  | 5-50 | 50-500 | 500-5.000 | >5.000 |
| Clase de magnitud             | <1  | 1-5  | 5-50 | 50-500 | 500-5.000 | >5.000 |
| Muretes de pie / escollera    | 0,25  | 0    | 0    | 0      | 0         | 0      |
| Muro alto                     | 1   | 0,50 | 0    | 0      | 0         | 0      |
| Muro alto/escollera (parcial) | 1   | 0,50 | 0    | 0      | 0         | 0      |
| Cuneta <5 m                   | 0,20  | 0    | 0    | 0      | 0         | 0      |
| Cuneta <5 m con vegetación    | 0,50  | 0,10 | 0    | 0      | 0         | 0      |
| Cuneta >10 m                  | 0,50  | 0,25 | 0    | 0      | 0         | 0      |
| Cuneta > 15 m                 | 1,50  | 1    | 0    | 0      | 0         | 0      |
| Pantallas <2000KJ             | 3   | 1    | 0    | 0      | 0         | 0      |
| Pantallas >2000KJ             | 3   | 2    | 1    | 0      | 0         | 0      |
| Galería de protección         | 4   | 3,5  | 3    | 2      | 1         | 0      |

Tabla 6. Factor de corrección (n) para el cálculo de frecuencia anual de desprendimientos en taludes/desmontes tratados con elementos de protección

La aplicación de los factores de corrección indicados en las Tablas 5 y 6 debe realizarse con criterio ingenieril y deberán revisarse una vez se disponga de más casos. Como los elementos

Debido a la limitación de espacio, presentamos ejemplos de **ECR** para dos tipos de peligro: desprendimientos rocosos y la rotura de muros de contención.

### 3. ECR PARA DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS

Los componentes que caracterizan el peligro son, por un lado, el volumen de la masa desprendida (que condiciona hasta qué punto se interrumpe la vía) y por otro, su probabilidad de ocurrencia o frecuencia. Aunque la vulnerabilidad de los vehículos y de las estructuras depende del tamaño y velocidad (energía cinética) que adquieren los bloques en su caída, en el presente análisis sólo se tiene en cuenta el volumen.

Se consideran los siguientes rangos de volúmenes de desprendimientos rocosos:

A:  $<0,5\text{m}^3$ ; B:  $>0,5-5\text{ m}^3$ ; C:  $>5-50\text{ m}^3$ ; D:  $>50-500\text{ m}^3$ ; E:  $>500-5.000\text{ m}^3$ ; F:  $> 5.000\text{ m}^3$

Cada rango de volumen muestra distinta **Pr o** frecuencia (tabla 3). La Tabla 4 presenta un ejemplo de estimación de costes directos en función del volumen desprendido consecuencias.

| Clase | Nº eventos | Periodo (años) | años | Frecuencia $f_a$ (eventos/año) | Magnitud ( $\text{m}^3$ ) |
|-------|------------|----------------|------|--------------------------------|---------------------------|
| A     | 104        | 1994-2009      | 15   | 6.933                          | 0.05-0.5                  |
| B     | 91         | 1994-2009      | 15   | 6.067                          | 0.5-5                     |
| C     | 24         | 1994-2009      | 15   | 1.600                          | 5-50                      |
| D     | 5          | 1960-2009      | 49   | 0.102                          | 50-500                    |
| E     | 1          | 1884-2009      | 125  | 0.008                          | 500-5000                  |
| F     |            |                |      | 0.003                          | $> 5000$                  |

Tabla 3. Clases de magnitud de desprendimientos y sus frecuencias respectivas en la carretera N-634 entre Zarautz y Getaria

| Clase                 | Consecuencias |                  |                             |   |   |   |
|-----------------------|---------------|------------------|-----------------------------|---|---|---|
|                       | A             | B                | C                           | D   | E   | F   |
| Volumen $\text{m}^3$  | $<0,5$        | $0,5 < V \leq 5$ | $5 < V \leq 50$             | $50 < V \leq 500$                         | $500 < V \leq 5.000$                                    | $> 5.000$   |
| Interrupción vía      | no            | No, sólo parcial | sí                          | sí  | sí  | sí  |
| Acciones              |               |                  | Paso alternativo + retirada | Interrupción vía + limpieza y saneo talud | Interrupción + limpieza y restitución + saneo intensivo | Interrupción + limpieza y restitución + saneo intensivo |
| Tiempo bloqueo (días) | 0             | 0                | 1                           | 5   | 10  | 30  |
| Coste (UC)            | 0,8           | 1,5              | 3,9                         | 17,5                                      | 117,2   | 172,4   |

Tabla 4. Factores que determinan el daño causado por los desprendimientos rocosos en función del volumen y ejemplos de valoración del coste asociado.

de contención no suelen superponerse, sólo se asigna un único valor. Se procede con el mismo criterio para los elementos de protección. Cuando el talud/desmonte dispone tanto elementos de contención como de protección, el “n” resultante es la suma de los dos factores.

En la aplicación del factor de corrección debe tenerse en cuenta entre otros, lo siguiente: (i) los elementos de contención/protección en los taludes de los PdR pueden no estar distribuidos de forma homogénea por el conjunto del talud y existir partes desprotegidas; (ii) los elementos de contención/protección pueden estar afectados por procesos de envejecimiento (p.e corrosión) o de impactos previos que pueden afectar a su funcionalidad. Por estos motivos, la corrección debe realizarse con un criterio de prudencia.

#### 4. ECR PARA ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN

En este apartado se analiza el riesgo derivado de la rotura de muros de hormigón, normalmente anclados al terreno. Debido a las incertidumbres en los parámetros de diseño, en especial de las características resistentes del terreno, no es posible establecer de manera precisa el nivel de seguridad de las estructuras. En la eventualidad de una rotura, las consecuencias son múltiples: daños en la propia estructura, invasión de la calzada por los derrubios y desestabilización de la ladera. Una parte significativa de los costes corresponde a los trabajos de estabilización/refuerzo de la ladera y a la reconstrucción del muro. En carreteras de calzada única, la rotura puede suponer la interrupción de la vía durante semanas o meses.

| Altura del muro o estructura (magnitud)                     | Rotura parcial o muro pequeño | Consecuencias  |  |
|---|-------------------------------|--|--|
|   |                               | ≤ 6 m  | > 6 m  |
| interrupción vía  | No o solo parcial             | sí   | sí   |
| Tiempo de bloqueo (días)                                    | 2                             | 10   | 20   |
| Acciones  | desescombros + saneo talud    | Desescombros + saneo + estabilización + reconstrucción muro + reparación carretera | Desescombros + saneo + estabilización + reconstrucción muro + reparación carretera |
| Desescombros + saneo (por 10 m) UC                          | 0,9 (V=50m <sup>3</sup> )     | 10,3 (V=570m <sup>3</sup> )  | 41,0 (V=2.280m <sup>3</sup> )  |
| Coste reconstrucción muro y reparación carretera (por 10 m) | 20,0                          | 44,8   | 76,3   |
| Coste total (UC) por 10 m                                   | 20,9                          | 55,1   | 117,3  |

Tabla 7. Daño causado por el fallo de las estructuras de contención / sostenimiento ancladas en función de su altura. Los costes están normalizados considerando un tramo de muro/estructura afectado de 10m de longitud.

El cálculo del potencial de fallo de una estructura de contención anclada en términos de probabilidad requiere el conocimiento de la variabilidad e incertidumbre de cada uno de los parámetros de diseño (p.e. resistencia del terreno, resistencia del contacto entre el anclaje y el terreno, entre otros) a partir de sus distribuciones de probabilidad. La información disponible no permite realizar este tipo de aproximación. Aquí, la Probabilidad de Fallo (**Pr**) se basa en criterio experto (probabilidad subjetiva). Consiste en una modificación de la Metodología del Sistema de Revisión de Anclajes desarrollada por Euroestudios (2004) para la Diputación Foral de Gipuzkoa. En la citada metodología se define un índice de peligrosidad heurístico como suma de los valores asignados a cada uno de los cinco componentes: F.S de proyecto de cada estructura anclada; diseño de los anclajes; evolución de la inestabilidad; proyecto y obra; y existencia o no de instrumentación y control. El índice de Peligrosidad tiene un valor comprendido entre 1 y 5.

En el presente trabajo, se ha definido un nuevo índice de peligrosidad (**IP**) con los mismos factores de Euroestudios (2004) y se ha establecido una relación con la probabilidad de rotura (**Pr**). Debido a que las estructuras tienen una vida útil y están sometidas a procesos de degradación que afectan la funcionalidad a medio-largo plazo, la **Pr** se corrige a partir de los resultados de auscultación (presiones y deformaciones) y/o de los indicadores de daño estructural o de actividad de la ladera.

### **Estimación de la probabilidad de fallo**

En la práctica ingenieril habitual, el criterio de diseño de las estructuras de contención /sostenimiento que disponen de anclajes suele basarse en la determinación del Factor de Seguridad (FS). Si bien raramente el FS tiene su traducción en términos de probabilidad de fallo, un diseño estructural de obras estándar diseñado con un  $FS \sim 2$  se le asigna una probabilidad anual de fallo inferior a  $10^{-5}$ ; mientras que con un  $FS \sim 1,5$  se le asigna una probabilidad de fallo inferior a  $10^{-4}$  (Silva et al. 2008).

El trabajo de Silva et al. (2008) es la base de la nueva metodología para cuantificar la probabilidad de fallo (ver Figura 1). Un aspecto clave de esta figura es la clasificación de estructuras en función del nivel de diseño ingenieril. La categoría I corresponde a estructuras diseñadas, construidas y gestionadas con los conocimientos más avanzados del estado del arte. La categoría II corresponde a estructuras diseñadas, construidas y gestionadas con las normas estándar. La categoría III son estructuras sin un diseño específico y una construcción o gestión sin seguir los estándares. Finalmente, la categoría IV, son estructuras con poca o nula ingeniería.

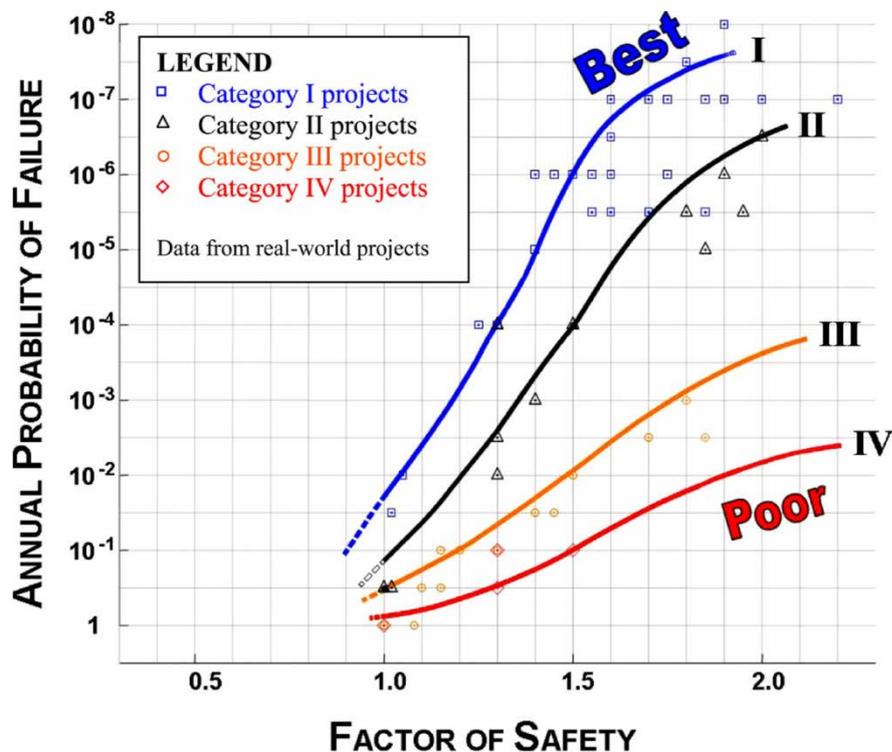


Figura 1. Probabilidad de fallo a partir del Factor de Seguridad, para distintas categorías de proyectos de ingeniería (Silva et al. 2008)

Para calcular el **IP**, hemos utilizado los tres los componentes indicados en la Tabla 8. Estos componentes expresan hasta qué punto la estructura de contención /sostenimiento está en condiciones de cumplir su función con garantías. Los componentes son los siguientes: Factor de seguridad de cálculo (FS), diseño de los anclajes (DA) y existencia de asistencia técnica en la ejecución (PO). IP se define como:

$$I = (FS + DA + PO) / 3$$

siendo

$$DA = (CS + LB + TB) / 3$$

| Parámetro            |                       | Valor     |          |              |           |                        |
|----------------------|-----------------------|-----------|----------|--------------|-----------|------------------------|
|                      |                       | 1         | 2        | 3            | 4         | 5                      |
| F.S. de cálculo (FS) |                       | >2        | 1,55-2,0 | 1,45-1,55    | 1,30-1,45 | <1,30                  |
| Diseño anclajes (DA) | Carga servicio (%L.E) | <55       |          | 55-65        |           | >65                    |
|                      | Longitud bulbo        | >1,2m/10t |          | 0,8-1,2m/10t |           | <0,8m/10t              |
|                      | Terreno bulbo         | Roca sana |          | mixto        |           | Suelo/roca meteorizada |
| Proyecto y obra (PO) |                       |           |          |              |           |                        |
| Datos sobre anclajes |                       | si        |          | no           |           | no                     |
| Asistencia técnica   |                       | si        |          | si           |           | no                     |

Tabla 8. Componentes utilizados para definir el índice de peligrosidad (IP)

Los tres componentes de la peligrosidad se les asignan valores comprendidos entre 1 y 5 y se promedian entre sí, obteniéndose el **IP**. Este índice I toma valores comprendidos entre 1 y 5. La relación entre I y la Probabilidad de Fallo se establece con el siguiente criterio (Tabla 9):

Se considera que las estructuras de contención /sostenimiento calculadas con un FS holgado (>1,5), un diseño adecuado de los anclajes y una adecuada supervisión técnica en obra, disponen de una probabilidad anual de fallo baja, inferior a  $10^{-5}$ . En el caso de no alcanzar los requerimientos más rigurosos de diseño, la Pr será magnificada convenientemente.

| Probabilidad anual de fallo ( <b>Pr</b> ) | Índice de Peligrosidad |
|---|------------------------|
| $0,1 < P$                                 | $I > 4,5$              |
| $0,01 < P \leq 0,1$                       | $3,2 < I \leq 4,5$     |
| $0,001 \leq P \leq 0,01$                  | $2,6 < I \leq 3,2$     |
| $0,0001 \leq P \leq 0,001$                | $2,0 < I \leq 2,6$     |
| $0,00001 \leq P \leq 0,0001$              | $1,45 < I \leq 2,0$    |
| $P \leq 0,00001$                          | $I \leq 1,45$          |

Tabla 9. Correspondencia entre los valores del índice de Peligrosidad y la Probabilidad de Fallo

Las asignaciones de probabilidades de fallo expresadas en la Tabla 9 deben interpretarse

como resultado del aumento de la incertidumbre sobre el comportamiento de la estructura ante la falta de datos o de trabajos de supervisión. Así, en ausencia de asistencia geotécnica durante la ejecución de los anclajes causa el aumento de la probabilidad de fallo en dos órdenes de magnitud. Esta penalización se justifica por lo siguiente: aunque el proyecto de estructura se haya realizado con un FS holgado y un buen diseño de los anclajes, la falta de seguimiento no permite garantizar que la ejecución se haya realizado conforme a lo proyectado.

El diseño y ejecución adecuados de la estructura debería reflejarse en la ausencia de sobrepresiones en los anclajes y de deformaciones en la estructura y/o terreno. Si por el contrario, el dispositivo de auscultación evidencia un incremento progresivo de las tensiones en los anclajes, la presencia de deformaciones, o la aparición de indicadores de inestabilidad (grietas, basculamiento del muro, etc), debe interpretarse en el sentido que la estructura no está cumpliendo su función de modo satisfactorio, que el sistema no está en equilibrio y que la **Pr** aumenta. Consiguientemente, el muro debería ser objeto de una supervisión más intensa y un nuevo análisis.

Para poner en evidencia esta situación, la **Pr** obtenida en la Tabla 9 se corrige a partir de otros dos parámetros relacionados con la Peligrosidad que son de carácter dinámico (las presiones en los anclajes y las deformaciones en la estructura/terreno y, en ausencia de ellas, el potencial de evolución de la inestabilidad). En el caso que las presiones o las deformaciones no experimenten variaciones debe entenderse que el terreno es estable y/o que la estructura de contención /sostenimiento trabaja correctamente por lo que la **Pr** no varía. El incremento de las tensiones, las deformaciones o la aparición de indicadores de daño estructural debe interpretarse como que la carga de servicio puede agotarse y que aumenta sensiblemente la probabilidad de fallo.

En este caso se han considerado dos situaciones con distinto nivel de prevención: (1) aumento de presiones en las células de carga con deformaciones inapreciables o muy bajas. Si las presiones no sobrepasan el 65% de la carga de servicio, se considera que la estructura no está sujeta a un riesgo inminente de rotura; (2) aumento de las deformaciones en la estructura de contención/sostenimiento y/o en el terreno. En este caso se considera que no se ha alcanzado la condición de equilibrio y que el riesgo de fallo es elevado.

El **IP** se modifica de la siguiente forma (Tabla 10): Si se detecta el aumento sistemático de las presiones en las células de carga sin que sobrepasen el límite del 65% de la carga de servicio (o las deformaciones acumuladas en el muro representen menos del 30% de la deformación máxima del hormigón) o la velocidad de los movimientos es inferior a un promedio de 3mm/a, se incrementa el Índice **IP** en una unidad. En cualquier caso, la estructura debe ser objeto de una revisión exhaustiva. Si no existe información de la auscultación, se utilizará en su lugar, el potencial de evolución de la inestabilidad de la Metodología SRA.

Si la velocidad de los movimientos es superior a un promedio de 3mm/a (o las deformaciones acumuladas en el muro suponen más del 60% de la deformación máxima del hormigón) o se observen indicadores, se incrementará I en dos unidades. Estos indicadores son evidencias de clara inestabilidad. En este caso se interpreta que el muro no está cumpliendo la función de estabilización/contención para el que fue diseñado y que existe el peligro de rotura.

| <b>Factor de aumento de IP</b> | <b>Aumento de la carga de servicio</b>                                     | <b>Deformación de la estructura y/o terreno</b> |
|--------------------------------|--|---|
| 0,3                            | Aumento de presión <65% del L.E. en <25% de los anclajes inspeccionados    | Deformación <3mm/a                              |
| 0,5                            | Aumento de presión <65% del L.E. en 25%-50% de los anclajes inspeccionados | Deformación <3mm/a                              |
| 0,5                            | Aumento de presión >65% del L.E. en <25% de los anclajes inspeccionados    | Deformación >3mm/a                              |
| 1,0                            | Aumento de presión >65% del L.E. en 25%-50% de los anclajes inspeccionados | Deformación >3mm/a                              |
| 1,0                            | Estructura sin instrumentar  | Sin deformación visible, ni grietas             |
| 1,2                            | Aumento de presión >65% del L.E. en >50% de los anclajes inspeccionados    | Deformación >3mm/a                              |
| 1,2                            | Estructura sin instrumentar  | Con deformación y grietas visibles              |

Tabla 10. Ajuste del Índice de Peligrosidad a partir de los resultados del dispositivo de auscultación

De la manera como se ha definido la peligrosidad, cada PdR tiene definido un único escenario de riesgo (en función de la probabilidad de rotura y las dimensiones del muro). El cálculo del riesgo deber ser el producto de la probabilidad anual de ocurrencia de dicho escenario por los costes derivados

## 5. COMENTARIOS FINALES/CONCLUSIONES

El análisis de los riesgos en la red de carreteras derivados de situaciones de naturaleza diversa es un reto. Los fallos/roturas de los elementos analizados como son las obras de fábrica, las estructuras de contención, los terraplenes, los desmontes y las laderas naturales, tienen probabilidades de ocurrencia muy diversa y también lo son las consecuencias que se derivan. Teniendo en cuenta estas circunstancias, hemos desarrollado una metodología con las siguientes consideraciones:

- La comparación de los niveles de riesgo asociados a elementos dispares como obras de fábrica, estructuras de contención/sostenimiento, rellenos, desmontes y laderas naturales se efectúa utilizando un mismo sistema de medida. Por este motivo se determina la evaluación cuantitativa del riesgo (ECR) en términos de probabilidad de fallo/rotura y las consecuencias derivadas del mismo
- El número de tramos a considerar con distintas problemáticas es elevado y los niveles de información muy variables, no permitiendo estimar la probabilidad de fallo con el mismo nivel de fiabilidad. El procedimiento elaborado en el presente documento es específico para cada una de las tipologías de rotura o fallo, y tiene en cuenta el análisis de los factores que de forma directa o indirecta tienen relación con la ocurrencia de la rotura (por ejemplo, episodios de lluvia, deformaciones, tensiones actuantes, criterios de diseño, etc.)
- El análisis de consecuencias ha sido planteado con un doble criterio. Las consecuencias directas, que son específicas para cada tipo de fallo y las consecuencias indirectas que se determinan con el mismo procedimiento en todos los casos. En las consecuencias indirectas, se valoran los costes asociados a desvíos de los usuarios y el aislamiento de las poblaciones.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores quieren agradecer a la Diputación Foral de Gipuzkoa-Gipuzkoako Foru Aldundia el apoyo para la realización de este trabajo y la autorización para la publicación de los resultados.

## **REFERENCIAS**

- Euroestudios 2004. Establecimiento de un Sistema de Revisión y Control de una parte de los Anclajes de las Carreteras de la Red Funcional del Territorio Histórico de Gipuzkoa 5-0-36/2002. Tomo 1 de 2. Octubre 2004
- Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S. and Leroi, E. 2005. A framework for landslide risk assessment and management. In *Landslide Risk Management*, Editors O Hungr, R Fell, R Couture and E Eberhardt, Taylor and Francis, London, 3-26
- Silva, F., Lambe, W.T. & Marr, W.A. 2008. Probability and risk of slope failure. *J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134:1691-1699. ASCE