

ESTIMACIÓN Y EVALUACIÓN DE FLUJO DE ESCOMBROS

Roberto C. Luque Pinto (1), Jorge E. Alva Hurtado (2)

RESUMEN

El estudio sobre Flujo de Escombros se presenta como uno de los aspectos a tener en cuenta en la estabilización de taludes, por lo tanto se hace necesario determinar parámetros para un diseño racional de estructuras que permitan mejorar la retención o desviación de escombros. La metodología presentada esta basada en una selección de conceptos prácticos publicados por Hungr y Morgan (1984), Benda y Cundy (1990) y otros. Estas publicaciones relacionan factores tales como el área fuente, longitud del cauce, la magnitud del flujo de escombros, la pendiente o peralte en las curvas del cauce, la velocidad y demás conceptos que se verán más adelante.

INTRODUCCIÓN

La mitigación de los peligros causados por los flujos de escombros que son un fenómeno común en nuestros Andes requieren de una evaluación detallada de las características geológicas, geotécnicas e hidrológicas de las áreas amenazadas. La severidad es variable, dependiendo de la magnitud de las lluvias, trayendo como resultado el cierre de carreteras y generando costos de mantenimiento.

El termino Huayco se emplea comúnmente para describir los flujos de escombros que son movilizaciones en masa de materiales saturados de suelos predominantemente de grano grueso que fluyen rápidamente por taludes escarpados. Ocurren comúnmente en áreas con relieves topográficos pronunciados y precipitación pluvial alta. La granulometría varía en tamaño desde arcillas hasta bolones que pueden ser mayores a los 5 m.

En este contexto las contribuciones geomorfológicas, hidrológicas y factores geotécnicos ayudan a examinar los riesgos de ocurrencia.

METODOLOGIA

1. ASPECTOS DE VALORACIÓN DE RIESGO DE FLUJO DE ESCOMBROS

Recientes estudios sobre el aumento de la presión de poros inducido por lluvias seguidas, a veces durante una sola lluvia en potenciales áreas fuente de flujo de escombros, las fallas ocurren cuando las presiones de poro alcanzan un nivel crítico que depende de la hidrología, geometría, y condiciones del suelo.

1.1. Factores Geotécnicos

Algunos de los estudios geotécnicos más recientes de flujos de escombros, se realizaron en Hong Kong, donde las fallas en suelo residual ocurren durante las intensas lluvias tropicales.

Hay evidencia de estudios realizados en otras regiones del mundo, que el flujo a través de zonas de conductividad hidráulica alta entre un estrato de suelo y el lecho de roca puede generar presiones de poro altas que pueden activar la falla. Así el énfasis está en la generación de fallas causadas por el exceso de presión de poros.

Mientras se han postulado varios mecanismos diferentes de iniciación de flujo de escombros a través del aumento de las presiones de poros, las investigaciones post-falla en flujos de escombros indican, sino en la mayoría, alguna cantidad de deformación inicial relativamente lenta, seguido por una transformación rápida del suelo en un líquido viscoso (Fleming 1989; Fannin 1993).

1.2. Respuesta Hidrológica de Taludes con Lluvia

Estudios de flujo de escombros generados por intensas lluvias en las montañas de Santa Monica - California, hizo pensar en un modelo conceptual para la generación de presiones de poro en un suelo-regolítico (donde el suelo regolítico es más reciente que el lecho de roca subyacente), el modelo presentaba infiltración de agua entre los estratos lo que generaba un aumento de la presión de poros y de las fuerzas de filtración en el talud.

2. METODOLOGIA PARA EVALUAR LOS PELIGROS Y LAS POSIBLES MEDIDAS CORRECTIVAS

La complejidad del diseño está generalmente determinada por los elementos en riesgo. Pues la protección de un poblado por ejemplo a diferencia de una carretera deberá garantizar el mínimo riesgo de la población. La complejidad también depende de los organismos competentes y de las finanzas disponibles.

El criterio deberá ser indiferente a las consideraciones para todos los tipos de estructuras de control y mitigación, el criterio de diseño es específico para cada lugar y debe considerar las características del flujo, el cauce y el tratamiento del área de descarga.

2.1 Tipos de Estructuras de Mitigación

Mientras las medidas pasivas intentan evitar el flujo de escombros zonificando y evacuando las áreas de peligro, las medidas activas intentan modificar tales eventos. Las medidas activas generalmente intentan controlar la magnitud del evento a través de las siguientes estructuras:

(1) U.N. San Luis Gonzaga de Ica

(2) Laboratorio Geotécnico CISMID-FIC-UNI

- 2.1.1 Localización de bermas deflectoras a lo largo de las márgenes del canal de flujo de escombros, desviando el flujo y proporcionando confinamiento lateral al área de deposición natural, aumentar al máximo dicha área y minimizar el ángulo de impacto, ver (Figura a).
- 2.1.2 Construcción de bermas terminales en el área de deposición natural con el fin de reducir el área (Figura b), también se construyen en la parte inferior del curso con el fin de resistir las fuerzas de impacto.
- 2.1.3 Los depósitos de escombros abiertos son una combinación de las bermas deflectoras y las bermas terminales ya que son áreas excavadas de deposición (Figura c). Se construyen de tal forma para que puedan captar parte de la deposición natural.
- 2.1.4 Los depósitos de escombros cerrados consisten en alguna forma de cubeta y berma terminal, se diseña para contener el flujo de escombros en su totalidad (Figura d). La cubeta se clasifica según su tamaño, y se diseña la berma terminal según el volumen y características del flujo de escombros.

3. ANALISIS CUANTITATIVO

La metodología para evaluar los peligros de los flujos de escombros y las posibles medidas correctivas incluyen tres fases principales. Estas son:

3.1 Mapeo de Reconocimiento y Clasificación

Se debe realizar un reconocimiento de campo durante el cual se clasificaran los canales de flujo de escombros observados tomando como base el tamaño del cauce, frecuencia aparente de ocurrencia y el volumen observado de los escombros. Con esta información preliminar se generarán planos de peligro mostrando zonas de impacto directo, zonas de impacto indirecto y zonas de inundación que será causada por el bloqueo del cauce principal. Una evaluación adicional en el ámbito de reconocimiento debe incluir la revisión de la información existente, fotografías aéreas, mapas topográficos, mapas geológicos y cualquier otra información disponible.

3.2 Mapeo Detallado y Evaluación de las Areas Prioritarias

Para las áreas de prioridad seleccionadas se debe efectuar una evaluación complementaria para el diseño de las medidas correctivas para ello se evalúa lo siguiente:

- a) Efectividad de las estructuras existentes
- b) Características de la cuenca de drenaje, incluyendo:
 - Área de la cuenca de drenaje
 - Marco geológico
 - Distancia de la(s) fuente (s) hasta la propiedad a proteger
 - Características del canal, como estabilidad de los escombros y taludes aproximados
- c) Características del Abanico Aluvial, incluyendo:
 - Pendiente aproximada, longitud y área
 - Características de los escombros y volumen aproximado
 - Potencial para la obstrucción del canal y cambios abruptos del mismo
 - Grados aproximados y potencial para construir estructuras de desvío o contención

3.3 Criterios de Diseño

La estabilización del área fuente a largo plazo da la mayor oportunidad

para reducir el peligro y los costos de mantenimiento asociados a obras viales, ya que dentro de las causas más comunes de desestabilización son la falta de vegetación y las prácticas pobres del uso de tierras.

El concepto de diseño para un evento es análogo al diseño de una avenida en Hidrología, aunque los datos disponibles no permiten la evaluación de un periodo de retorno. Por lo tanto para el diseño de la estructura se toma la máxima avenida que podría ocurrir durante la vida útil de la estructura. Los parámetros para el diseño requerido se discuten a continuación:

3.3.1 Magnitud del evento o Volumen de escombros

La magnitud del evento es el volumen total de material de escombros transportado en el curso de un solo evento. La determinación del espacio necesario para almacenar en depósitos de retención, también nos permite obtener un índice global de la severidad del evento. La magnitud depende obviamente del tamaño del área fuente y de la vulnerabilidad de los materiales a ser movilizados bajo condiciones de flujo de avenidas.

En una primera aproximación, podría correlacionarse la magnitud con el tamaño de la cuenca de drenaje. La relación entre la magnitud del torrente y el área de drenaje está dado en (m^3/km^2), la variación en los cauces de escombros dentro de una región dada se debe a las diferencias en el carácter topográfico y geológico.

Con suerte se desearía establecer una clasificación de cauces teniendo en cuenta la pendiente, tipo de material, altura y pendiente de los taludes laterales, si el material es erosionable, y la condición de estabilidad general del cauce reflejado en la vegetación.

3.3.2 Frecuencia de ocurrencia

Pueden hacerse estimaciones cualitativas basados en evidencia visible y geológica y por información obtenida in-situ. Hay una distinción importante entre los cursos sobre el lecho rocoso y aquellos depósitos sin consolidar, el anterior requiere acumulación gradual de detritos de un evento a otro y por consiguiente temporalmente estable antes del evento. El último, por otro lado, puede ser desestabilizado por un evento y esto puede llevar a un periodo de actividad frecuente, seguido por un retorno al estado inactivo.

3.3.3 Descarga de escombros

Los flujos de escombros ocurren en oleadas que se mueven como una onda con velocidad constante pero con variación de descarga. Comúnmente el material del frente de la ola consiste en material de bolonería, este material presenta la mayor resistencia de flujo y en un canal confinado se impulsa mediante el empuje de la gran cantidad de material líquido que se encuentra detrás. Las descargas se calculan determinando el área del canal natural tomando secciones transversales en las cuales se observará la línea de barro dejada, a esto se suma las relaciones empíricas entre el talud, confinamiento del canal y velocidad dada.

3.3.4 Velocidad de flujo

Para la determinación de la velocidad puede estimarse para una profundidad de flujo alcanzada y una sección determinada. A continuación se presenta el Gráfico (1) en el que se relaciona los datos de profundidad con la descarga, el Gráfico 1 indica una dependencia de la velocidad con respecto a la profundidad, lo que indica que es típico para un flujo del tipo laminar. Una comparación mostrada en el Gráfico 1 se observa flujo turbulento para el caso de agua tendría una tendencia fuertemente diferente.

Hay un acuerdo general en la literatura que el régimen de flujo cerca de la cresta de la onda de flujo de escombros, es de hecho laminar (Pierson 1980, Takahashi 1981).

Evidencia que apunta a esta conclusión incluye la calma relativa de superficies de flujo, la existencia de concentraciones de cantos rodados al frente.

El criterio experimental también basado en el número de Reynolds y Hedstrom apuntan en la misma dirección (Jelapayan 1980).

Dado la asunción de flujo laminar, la velocidad media v (m/s), más allá depende de la resistencia del flujo. Diferentes modelos de flujo se han sugerido para el flujo uniforme de escombros todos los cuales pueden ser resumidos a través de la siguiente ecuación.

$$v = \frac{\gamma \times S \times h^2}{k \times \nu} \quad \text{Ecuación (1)}$$

donde:

- γ = peso unitario de los escombros (KN/m³)
- S = pendiente
- h = altura del flujo (m)
- k = coeficiente que depende de la forma de la sección transversal del canal/
 - $k = 3$ sección rectangular
 - $k = 5$ sección trapezoidal
 - $k = 8$ sección semicircular
- ν = viscosidad dinámica aparente (KPa.s)

El diseño de canales de desvío y barreras de escombros con vertedero para proyectos viales, generalmente se basan en la ecuación (1).

3.3.5 Perfil de onda

El material de flujo de escombros es característicamente bien gradado (Pierson 1980; Hungr 1981). No obstante podría considerarse como una dispersión del material grueso el cual está suspendido en el barro pastoso y las partículas finas se encuentran suspendidas por la turbulencia del agua.

Bagnold en 1954, empleo el termino de esfuerzos efectivos para mostrar la fricción en taludes (S_f), donde la dispersión depende principalmente de la concentración de volumen (C) de partículas sólidas aquellas que no son suspendidas por turbulencia.

$$S_f = \frac{b - \rho_f}{b - \rho_f + \rho} \times \tan \alpha \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

- α = ángulo de fricción dinámico de las partículas
- σ = densidad del material granular
- ρ = densidad de las partículas finas

Puesto que normalmente se hacen estimaciones de velocidad próximas a la parte superior del abanico, donde solo un rango limitado de ángulos ocurre, la viscosidad del flujo de la onda puede asumirse razonablemente como único y transferible de un evento a otro. Una excepción se levantaría quizás en materiales con volumen sustancial de finos plásticos.

3.3.6 Ángulo de deposición

Las observaciones de campo indican que hay un cierto ángulo por debajo del cual un flujo de escombros pierde su habilidad de viajar a velocidad uniforme, disminuye la velocidad y empieza a depositar el volumen de su material.

Las condiciones para el principio de la deposición se darían en la ecuación (2), si uno pudiera asumir concentración uniforme. Sin embargo debido a la disminución longitudinal en concentración, la ecuación (2) indica que la cresta de la onda gradualmente se traslada hacia atrás.

La fricción en el talud debido a la acumulación de cantos rodados en la parte frontal del flujo está relativamente libre de finos. Parece estar comprendido entre los 16 grados, desde que la deposición parcial

de la masa fronteriza empieza a ocurrir debajo de este ángulo.

Sin embargo con tal que el flujo se confine bien dentro del cauce, el material más líquido ubicado en la parte posterior del flujo puede continuar empujando el frente hacia delante.

Todos los eventos de descarga máximos observados hasta hora en Canadá empezaron su deposición entre los 10 a 12 grados, en cada caso el punto de deposición coincidió también con la salida de un cauce confinado.

El mismo ángulo se ha designado independientemente como el ángulo de deposición por un estudio realizado en Japón (Ikeya 1981).

3.3.7 Distancia alcanzada

Una vez que la deposición empieza, la desaceleración gradual del frente de la ola sigue dentro de una cierta distancia.

La distancia alcanzada en alud de nieve se calcula por los principios de conservación de momentos y asume que la fricción del talud durante la distancia alcanzada sigue siendo constante, o una función de la velocidad solamente (Voellmy 1955, Salm 1966).

Un acercamiento similar puede aplicarse a los flujos de escombros, Takahasi y Yoshida en 1979 formularon la ecuación de conservación de velocidad adquirida con una inclinación baja constante, después de salir de un cauce empinado. La ecuación se reduce a:

$$X_L = \frac{V^2}{G} \quad \text{(ecuación 3)}$$

donde:

x_L = distancia alcanzada

$$V = v_u \times \cos(\theta_u - \theta) \left\{ \frac{g \times h_u \times \cos \theta_u}{2 \times v_u^2} \right\}$$

$G = g \times (S_f \times \cos \theta - \sin \theta)$

θ = ángulo de la pendiente de la distancia alcanzada

θ_u = ángulo de la pendiente del canal de entrada

v_u = velocidad de entrada

h_u = altura de entrada

g = aceleración de la gravedad

Asumiendo que S_f es igual a ($\tan 10^\circ$) y que v_u y h_u puede obtenerse la descarga de diseño de la ecuación (1), la distancia alcanzada puede ser nuevamente calculada.

Esto es importante por que la aplicación de la ecuación (3) incorpora todos los parámetros vistos anteriormente: descarga, velocidad, así como el ángulo de deposición.

3.3.8 Sobreelevación y sobre-salto

La sobreelevación del flujo de escombros en zonas de curva del cauce son importantes por dos razones:

La primera, necesita ser determinada para el diseño del borde libre necesario en lado externo de las curvas y así diseñar muros deflectores.

La segunda, determinar la altura diferencial dejada por la línea de barro en zonas de curvatura para poder estimar la velocidad de eventos pasados.

En analogía con aludes de nieve (Mears 1981), la sobreelevación de flujo de escombros puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$\Delta h = k \times \frac{b \times v^2}{r \times g} \quad \text{(ecuación 4)}$$

donde:

Δh = es la diferencia de elevación entre dos lados del flujo

b = ancho de la superficie del flujo

v = velocidad media

r = radio de curvatura medio

k = coeficiente de corrección definido más adelante

Para lograr estimaciones conservadoras, se recomienda emplear $k=5$

para el cálculo de la sobreelevación de diseño.

El sobre-salto en el caso de barreras ubicadas en el camino del flujo puede estimarse de la ecuación (3), con el ángulo θ siendo ahora negativo e igual al ángulo formado por el sobre-salto con la pendiente. Cuando se prueban valores diferentes, el ángulo de 15° siempre da el máximo valor de sobre-salto, para propósitos de diseño se debe asumir que una ola de flujo de escombros pudiera depositar una cuña de escombros delante de la barrera en la que el flujo subsecuente podría sobrepasar la altura máxima (ver figura 2b). El diseño del sobre-salto bajo esta consideración, emplearía la figura (2a) donde también se muestra la carga de velocidad:

$$V = \frac{v_u}{2 \times g}$$

En la mayoría de los casos, el sobresalto es mayor que la carga de velocidad, debido al empuje del material transportado que viene detrás del frente.

3.3.9 Empuje dinámico e impacto

En el caso de barreras que son casi perpendiculares a la dirección del flujo, el empuje más significativo es donde hay una variación lateral pequeña.

Para calcular la carga del empuje dinámico debe emplearse la ecuación de momentos por consiguiente se debe tomar la cresta entera de la ola como una sola carga de flujo con una velocidad uniforme igual a la velocidad media.

Ecuación de Momento:

$$F = \rho \times A \times v^2 \times \sin \beta \quad (\text{ecuación 5})$$

donde:

- F = fuerza total del empuje
- A = área de la sección transversal del flujo
- ρ = densidad de los escombros
- β = el menor ángulo entre la barrera y la dirección del flujo

Se recomienda que la carga anterior deba distribuirse sobre una área tan ancha como los escombros esperados, pero aproximadamente 1.5 veces mayor en altura, para considerar la formación de una cuña delante del pie de la barrera.

Las cargas de impacto de punto debido a cantos rodados llevados en el flujo pueden ser más importantes para el diseño de ciertos elementos estructurales.

La magnitud del punto de impacto depende de la velocidad adquirida de la partícula más grande involucrada en la deformación del contacto, con la deflexión de la estructura impactada. La deformación del contacto sólo es importante en el caso de estructuras rígidas como estribos de puentes.

Para los elementos flexibles como vigas, la deformación estructural es más importante que la deformación de contacto.

Igualando la energía cinética de los cantos rodados con el trabajo de deformación, se obtiene:

$$P = \sqrt{M \times v^2 \times K} \quad (\text{ecuación 6})$$

donde:

- P = fuerza de impacto, en (KN)
- M = masa del canto rodado, en (Mg)
- v = velocidad, en (m/s)
- K = factor de rigidez

CONCLUSIONES

- (a) Para muchas zonas de flujo de escombros, no es económico o práctico realizar medidas correctivas. No obstante existen otras alternativas como aceptar el daño causado y planificar las reparaciones de emergencia, tal planificación podría incluir la compra de equipo para las labores de limpieza de escombros.
- (b) Los alcances presentados son un acercamiento cuantitativo para solucionar en parte los problemas relacionados con los flujos de escombros, se ha tratado de combinar el marco teórico del fenómeno con observaciones detalladas de campo. Con esto se busca dar énfasis a la calibración de los procedimientos.
- (c) Cabe señalar que el análisis teórico por ningún motivo debe reemplazar, el uso de la experiencia y el juicio informado.
- (d) La importancia de coleccionar datos cuantitativos como volúmenes de escombros, flujo de las secciones transversales, y velocidades de los eventos debe enfatizarse, estas provisiones representan un acercamiento racional para diseñar y así constituir una herramienta útil en el desarrollo de medios para mitigar los efectos de los flujos de escombros.

REFERENCIAS

1. W.E. Dietrich, and N. Sitar, GEOSIENCE AND GEOTECHNICAL ENGINEERING ASPECTS OF DEBRIS-FLOW HAZARD ASSEMENT. Conference International; San Francisco 1997.
2. C.A. Robertson, ESTABILIZACIÓN DE TALUDES, Curso de Actualización Profesional del C.I.P.; Lima 1997
3. D.F. Van Dine, O. Hungr et al, CHANNELIZED DEBRIS FLOW MITIGATIVE STRUCTURES IN BRITISH COLUMBIA, CANADA. Conference International; San Francisco 1997.
4. G.Fiebiger, STRUCTURES OF DEBRIS FLOW COUNTERMEASURES. Conference International; San Francisco 1997.
5. Benda L.E. and Cundy, T.W, PREDICTING DEPOSITION OF DEBRIS FLOWS IN MOUNTAIN CHANNELS. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27; Canada 1990
6. O. Hungr and G.C. Morgan, QUANTITATIVE ANALYSIS OF DEBRIS TORRENT HAZARDS FOR DESIGN OF REMEDIAL MEASURES. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 21; Canada 1984.

