

APENDICE I

**ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO EN MATERIAS DE MOVIMIENTO
EN MASA DE SEDIMENTOS Y CORRIENTES DE DETRITOS (ALUVIONES)**

APENDICE I

	Págs.
1. Introducción	1
2. Fenómenos y Movimiento en Masa y Flujos	2
3. Flujos o Corrientes de Detritos	4
4. Cuantificación desde el punto de vista de la Ingeniería de las corrientes de Detritos	8
a.1 Aspectos generales	8
a.2 Propiedades físicas y reológicas	9

APENDICE I

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO EN MATERIAS DE MOVIMIENTO EN MASA DE SEDIMENTOS Y CORRIENTES DE DETRITOS (ALUVIONES)

Preparado por Luis Ayala Riquelme
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

1. INTRODUCCION.

Los fenómenos relacionados con el movimiento en masa de sedimentos, dentro de los cuales se incluyen los deslizamientos, las avalanchas o los aludes y las corrientes de detritos y de barro, tienen interés académico no sólo como parte del amplio tema de los procesos físicos que modelan el paisaje y determinan la geomorfología de una región, sino también porque a menudo ocasionan catástrofes causando grandes daños y pérdidas de numerosas vidas humanas.

Estos fenómenos naturales, lo mismo que los terremotos, las inundaciones, los tsunamis y las erupciones volcánicas, generan una serie de riesgos al ser humano ya que afectan tanto su integridad física como sus actividades, y por lo mismo, se les incluye dentro del grupo de los denominados riesgos geológicos-hidrologicos o riesgos geofísicos.

Es un hecho conocido que en la medida que un país crece y se desarrolla, aumentan sus pérdidas anuales medias y los riesgos de ocurrencia de catástrofes naturales por cuanto se tiende a ir ocupando zonas del territorio cada vez menos seguras: zonas ribereñas costeras desprotegidas y más expuestas a acciones marítimas devastadoras, sectores altos y de mayores pendientes más propensos a los movimientos en masa de sedimentos, y zonas remotas expuestas al efecto eventual de erupciones volcánicas. También se tiende a ocupar áreas bajas inundables, conos de deyección y zonas de suelos de mala calidad geomecánica.

Como lo señala Hays (1981), la adecuada planificación y toma de decisiones para la ocupación de un territorio compromete a prácticamente todos los niveles de una nación. Ella requiere de una información científico-técnica adecuada acerca de la diversidad de procesos físicos que explican la ocurrencia de estos fenómenos naturales, de modo de conciliar las a menudo contrapuestas metas de seguridad ciudadana con las necesidades habitacionales o de desarrollo económico de una comunidad.

Por medio de la adopción de diversas acciones, como las que se detallan a continuación, en opinión de Hays puede conseguirse aumentar significativamente la

seguridad pública, y al mismo tiempo, lograr un mejor estándar de vida, aceptando que los planificadores y técnicos puedan ponerse de acuerdo para analizar e identificar en conjunto soluciones técnicas factibles:

- Evitar la ocupación de áreas donde las probabilidades de ocurrencia de un fenómeno natural sean medianas o altas.
- Zonificar el suelo para normar el uso del terreno con ciertos fines específicos o emplear sólo edificaciones adecuadas dependiendo del grado de riesgo existente.
- Materializar medidas estructurales relacionadas con el diseño y construcción de obras que posibiliten reducir los riesgos.
- Materializar medidas económicas orientadas a redistribuir las potenciales pérdidas económicas por medio de seguros u otros instrumentos financieros.

Resulta obvio pensar que el planteamiento y materialización de acciones como las arriba enumeradas, sólo puede conseguirse en la medida que el conocimiento científico y técnico de los distintos fenómenos naturales, que ocurren en cada región geográfica del país, alcance un nivel mínimo adecuado compatible con estos objetivos. Para ello resulta imprescindible hacer consciente a las autoridades y a las instancias de decisión política de la complejidad que conllevan estos problemas así como sus soluciones, lo cual necesariamente exige orientar esfuerzos y recursos económicos en forma permanente hacia programas de investigación sistemáticos sostenibles en el tiempo. En el ámbito administrativo-institucional, también es necesario sentar las bases para la creación de una instancia técnica que centralice y coordine este tipo de programas y las acciones de prevención de los desastres naturales.

2. FENOMENOS DE MOVIMIENTO EN MASA Y FLUJOS

Estos fenómenos agrupan una variedad amplia de procesos que conducen a la remoción y traslado masivo de suelo, hacia lugares más bajos y lejanos de su área de origen. Existen diversas formas de clasificar estos fenómenos, dependiendo de la ciencia o disciplina que los haya estudiado.

La Federal Emergency Management Agency (FEMA, 1989) incluye dentro del término genérico "Landslide", que traducido literalmente significa "deslizamiento de tierra" a todo movimiento perceptible de suelo, roca y vegetación bajo influencia gravitacional, sea ésta de origen natural o antrópico. El deslizamiento se asocia con la falla de laderas ó taludes inestables producto de la acción humana o de factores naturales tales como el clima, la erosión, la meteorización, los movimientos sísmicos, la sedimentación brusca en áreas deltaicas, las olas y las depresiones bruscas de niveles en ríos y estuarios, éstas últimas condicionadas principalmente por la acción de las mareas.

Dentro de la Geología también, el ya clásico trabajo de Varnes (1978), proporciona definiciones que permiten clasificar los movimientos en masa, en las siguientes categorías:

- (1) Movimientos súbitos o fallas de tierra, dentro de los cuales se incluyen los derrumbes, los desplomes o desprendimientos y los deslizamientos (rotacionales, traslacionales y en bloque).
- (2) Los esparcimientos laterales de terreno debido a la licuefacción de suelos saturados no-cohesivos (arenas y limos) por efecto de movimientos sísmicos o cambios en la composición química en el agua contenida en los poros y constituyentes minerales del suelo.
- (3) Los movimientos bajo las formas de flujos, escurrimientos o corrientes, dentro de los cuales se incluyen la reptación (movimiento imperceptiblemente lento de una ladera), los flujos o corrientes de detritos, las avalanchas de detritos, las corrientes de suelo o tierra, las corrientes de barro, los lahares y los deslizamientos de tierra subacuados.

Desde un punto de vista agronómico-medio ambiental y más específicamente, del uso y conservación de suelos como recurso natural, el INDERENA (Ayala, 1984), proporciona una clasificación general de estos fenómenos dentro del contexto más amplio de los procesos de erosión y pérdida de suelos, a partir de la identificación de los agentes y factores condicionantes de estos procesos.

Dentro de los agentes están incluidos los elementos del medio físico que causan directamente la remoción, transporte y depositación de las partículas y conglomerados de suelo: la gravedad, el agua y el viento; también, otros agentes como el hielo y los microorganismos. Cuando predomina la gravedad y el agua como agentes del fenómeno, se habla propiamente de fenómenos de "remoción en masa".

La acción de los agentes puede ser incrementada o reducida por diversos factores que aceleran o retardan la ocurrencia de los fenómenos: clima (precipitaciones, intensidad de las lluvias, frecuencia, duración y distribución de las estaciones secas y lluviosas), suelo (estabilidad estructural, permeabilidad, porosidad, composición granulométrica, propiedades físico-químicas del suelo, etc), relieve (pendiente, longitud de las laderas, forma y exposición de las mismas, etc), formaciones geológicas en superficie (afloramientos rocosos, depósitos), cobertura vegetal y el factor humano.

Según el mecanismo predominante que genera el movimiento de los suelos, se habla de fenómenos de tipo físico o de tipo químico, y según los agentes que predominan, de erosión hídrica, eólica y de fenómenos de remoción en masa,

dominando en estos últimos el efecto de la gravedad y del agua.

De acuerdo con la velocidad de generación, los movimientos se clasifican en flujos rápidos y lentos. Son flujos rápidos, los desplomes o desprendimientos, los deslizamientos, y los derrumbes, estos últimos variando desde secos (producen escombros de avalanchas) hasta húmedos o saturados (escombros aluviales). Los flujos lentos incluyen la reptación, la soliflucción y las terracetas o "caminos de ganado o patas de vaca".

Atendiendo al comportamiento mecánico, Takahashi (1981), define los movimientos masivos de sedimentos como caídas, deslizamientos y flujos de conglomerados ó de sedimentos dispersos. Tienen en común el que tanto las partículas sólidas como el fluido intersticial son movidos por la gravedad, de modo tal que la velocidad relativa entre la fase sólida y fluida en la dirección del desplazamiento de la masa, juega sólo un papel secundario. Por contraste, en el flujo de un fluido propiamente tal, las fuerzas hidrodinámicas de sustentación y arrastre, debido a la existencia de velocidades relativas, son fundamentales para el transporte de las partículas sólidas individualmente.

Atendiendo al mecanismo dominante del movimiento, a las propiedades del fluido intersticial, a la velocidad de desplazamiento y a la distancia de recorrido, Takahashi distingue cuatro categorías de movimiento en masa de sedimentos:

- 1) Desprendimientos o caídas, deslizamientos y flujos de reptación en los cuales el movimiento se realiza con pequeña deformación interna, es decir, con un comportamiento más cercano a un sólido que a un fluido.
- 2) Sturzstrom o corrientes detríticas catastróficas o deslizamientos catastróficos en los cuales ocurre una desintegración inicial de la masa y los detritos escurren a lo largo de un valle casi horizontal a velocidades enormes.
- 3) Flujos piroclásticos provocados por erupciones volcánicas.
- 4) Flujos de detritos en los cuales las partículas son dispersadas dentro de una masa de agua o pulpa definidos. Las tres últimas categorías quedan incluidas dentro del grupo que denomina del "flujo gravitacional de sedimentos".

3. FLUJOS O CORRIENTES DE DETRITOS.

a) Definiciones y Terminología Empleada.

De acuerdo con la clasificación de Varnes, (1978) los flujos de detritos ("debris flow") constituyen una forma de movimiento en masa rápido en el cual suelo suelto,

fragmentos de roca y materia orgánica diversa, se mezclan con aire atrapado en poros y agua dando origen a una pulpa o concentrado líquido-sólido que escurre pendiente abajo. Es usual que los flujos de detritos estén vinculados a la presencia de quebradas o surcos de fuerte pendiente siendo sus zonas de depositación áreas más planas y lateralmente extendidas con la forma de abanicos o conos de detritos.

Un flujo de detritos rápido o muy rápido es definido por Varnes como avalancha de detritos. El movimiento de materiales de granulometría más fina o rocas con contenidos significativos de arcilla, secos o saturados, se define como flujo o corriente de tierra ("earthflow"). La característica más relevante de una corriente de tierra es su forma de reloj de arena, en que la cabeza la constituye una depresión redondeada o circo; en él inicialmente se junta el material inestable para luego fluir por una garganta más angosta hasta descargar y depositarse finalmente al pie de la ladera en el piso del valle, conformando un depósito redondeado semi-circular.

Cuando una corriente de tierra contiene material suficientemente húmedo como para escurrir en forma rápida y este material está constituido al menos por un 50% en peso de partículas del tamaño de arena, lino y arcilla, se habla de corriente o colada de barro ("mudflow").

El lahar es una forma especial de corriente de detritos o colada de barro que se origina en las laderas de un volcán como consecuencia de la remoción y acarreo de depósitos volcánicos producido por lluvias intensas, derretimiento brusco de nieve o hielo o vaciamiento súbito de agua debido a la ruptura de represamientos causados por glaciares, lagos-cráteres o lava de anteriores erupciones. Según Mac Phail (1973) el término lahar fue introducido en la literatura de las Ciencias de la Tierra en 1929 por Scrivenor y utilizado por Bernmelen en 1949 para describir las corrientes de barro volcánica y detritos que ocurren con frecuencia en Java, sin que necesariamente se considere que el material removido sea el resultado directo de volcanismo.

VanDine (1984) define lo que denomina un "torrente de detritos" como un movimiento en masa que involucra a un flujo de agua cargado predominantemente por material inorgánico de granulometría gruesa y materia orgánica, muy rápido que se produce en cauces existentes confinados y de pendiente pronunciada.

Según este autor, otros términos que han sido utilizados y que siguen en uso para describir fenómenos de características similares son: corrientes alpinas de barro ("alpine mudflows"), corrientes confinadas en valles ("valley-confined flows"); flujos canalizados de detritos ("channelized debris flows"); corrientes de detritos de montaña ("mountain debris flows") o simplemente flujos de detritos ("debris flows") como lo emplean Varnes y Takahashi.

La terminología que se usa en hispanoamérica para identificar y describir los rápidos movimientos masivos de material sólido y agua es bastante amplia y ambigua.

Carrillo (1987) describe los que en Perú son llamados "huaycos" (palabra quechua que significa quebrada): "los huaycos peruanos se definen como grandes volúmenes movidos bajo la forma de flujos rápidos de aguas turbias, cargadas de clastos, bloques de roca, vegetación, troncos, nieve, etc., como materiales consolidados en superficie que al humedecerse adquieren gran movilidad, desplazándose a través de quebradas de régimen hídrico temporal o seco que sufren grandes precipitaciones pluviales en forma intermitente y tienen pendientes empinadas y escasez de vegetación". Carrillo utiliza también la palabra "aluvión" para describir las corrientes de detritos producidas por aludes y avalanchas provocadas por derrumbes de montañas, encauzados a alta velocidad por quebradas y ríos con fuertes pendientes.

Golubev (1973) define avalancha o rodado como la masa de nieve que desliza por la superficie inclinada de una pendiente de montaña. Este autor utiliza también indistintamente la palabra "alud". Por otro lado, describe las "corrientes de barro (mud stream, mud flow o debris flow en inglés; lave, lave torrentielle, avalanche boueuse en francés; mure, murgrang, ruff, ruffe en alemán) como una mezcla sólido-líquida que no siempre es barro: "La mezcla puede contener, además, detritos de varios tamaños que van desde cantos rodados a limos finos. El porcentaje de material detrítico puede alcanzar 50% del volumen total de la corriente".

El Diccionario de la Lengua de la Real Academia Española (Vigésima Edición, 1984) define aluvión como "avenida fuerte de agua, inundación" y también da las acepciones siguientes: "accesión paulatina, perceptible en el tiempo, que en beneficio de un predio ribereño va causando el lento arrastre de la corriente"; "dícese de los terrenos que quedan al descubierto después de las avenidas y de los que se forman lentamente por los desvíos o las variaciones en el curso de los ríos". Como se aprecia, el significado de aluvión es muy amplio y por lo mismo, inadecuado como término técnico para describir una corriente de detritos.

b) Principales Características de las Corrientes de Detritos.

Según Golubev (1973), las corrientes de detritos y barro, que como ya se ha señalado, contienen hasta un 50% de material detrítico con respecto al volumen total, tienen una duración breve que generalmente no sobrepasa sino algunas horas. Bajo estas condiciones la corriente se comporta como un líquido cuyo peso volumétrico alcanza $1,8 \text{ ton/m}^3$. Cuando el porcentaje de detritos supera el 50%, la corriente se hace "coherente", comportándose como una masa pegajosa debido a la gran cantidad de barro; cuando se detiene, el agua no se separa del conjunto. Por su consistencia, las corrientes de detrito y barro se dividen en dos categorías: las no coherentes, que tienen un movimiento turbulento, y los coherentes, que se mueven como un cuerpo plástico. Las no coherentes se dividen a su vez en corrientes pedregosas, de piedra y barro, y de barro propiamente tal, aumentando en este orden su peso volumétrico desde $1,15 \text{ ton/m}^3$ hasta $1,50 \text{ ton/m}^3$ y más. Debido a su gran peso, volumen y

velocidad (pueden transportar bloques de roca de cientos de toneladas, acarrear varios millones de metros cúbicos de material y tener velocidades que exceden los 5 m/s), las corrientes poseen una enorme fuerza destructiva, produciéndose la mayoría de ellas en zonas montañosas, sobre todo en las de clima árido.

Para la generación de una corriente de detritos, se requieren básicamente tres condiciones:

- La cuenca debe contener mucho material detrítico, el cual constituye la fase sólida de la corriente.
- Gran cantidad de agua de lluvia, de fusión de nieve o hielo, o agua proveniente del vaciado súbito de embalses naturales o artificiales, la que forman la fase líquida de la corriente.
- El lecho de la hoya debe tener pendientes empinadas para asegurar que por efecto gravitacional se mueva la masa.

Según este autor, la falta de lluvia explica la escasez o poca frecuencia de corrientes detríticas en el Norte de Chile, y en el Sur, la carencia de material detrítico y la importancia de la cubierta arbórea son factores que minimizan la ocurrencia de estos fenómenos.

En la literatura técnica más reciente (última década) se encuentran diversos trabajos orientados a aclarar desde un punto de vista más cuantitativo ciertos aspectos relevantes característicos de las corrientes naturales de agua y sedimento. Ello principalmente con el fin de clasificarlas de acuerdo con ciertos parámetros físicos significativos que permitan en último término avanzar hacia una mejor descripción de los procesos individuales que llevan asociados y en su modelación.

Así por ejemplo, en opinión de Bradley y Cutcheon (1985), no obstante la gran cantidad de investigaciones realizadas, las más recientes de las cuales han sido hechas en Japón y China, subsisten todavía diferencias entre ingenieros, geólogos, geomorfólogos e investigadores en general, en cuanto a la clasificación de las corrientes hiperconcentradas y detríticas. Se señala por ejemplo, cuáles han sido los aspectos más significativos tenidos en cuenta en los distintos trabajos realizados para clasificar este aspecto:

- Mecanismo desencadenante. De acuerdo con la forma en que se genera una corriente se habla de lahares, corrientes de barro de regiones montañosas, semi-áridas y alpinas, corrientes morrénicas o cercanas a glaciares.
- Composición de sedimentos. Bajo el 20% de concentración de sólidos en volumen es el agua el factor determinante del comportamiento de la corriente, pero la división

entre flujos hiperconcentrados y flujos detríticos es todavía esencialmente materia de desacuerdo. Los flujos que se observan en Japón son, por ejemplo, básicamente detríticos en tanto los de China que contienen material más fino, son posiblemente hiperconcentrados o corrientes de barro.

- Comportamiento reológico. Dado que los modelos newtonianos no pueden considerar adecuadamente los efectos de cohesión ni de fricción interna, se han propuesto modelos alternativos como el del plástico ideal o de Bingham para pulpas compuestas de arcillas o finos, el modelo pseudoplástico o dilatante, etc.

- Propiedades físicas del fluido. La densidad y viscosidad dependen básicamente de la concentración de sólidos, pero el parámetro de Bingham de fluidos de comportamiento plástico, depende además de la granulometría, tamaño de las partículas y forma de ellas.

Costa (1988) por su parte, analiza y describe aspectos reológicos-hidrodinámicos, geomorfológicos y sedimentológicos que en su opinión permiten diferenciar en términos cuantitativos a estos flujos, proponiendo tres categorías: crecidas o avenidas fluviales turbias, corrientes hiperconcentradas de sedimento y flujos de detritos.

Desde el punto de vista reológico-hidrodinámico los flujos detríticos se consideran no-newtonianos (viscoplásticos) con concentraciones volumétricas de sólidos entre 47 y 77%, densidades entre 1,8 y 2,3 gr/cm³, viscosidades dinámicas que superan a la del agua en más de 20.000 veces por lo cual su régimen es laminar.

Desde el punto de vista geomorfológico-sedimentológico, los depósitos y su estructura y composición sedimentaria permiten también distinguir entre los diferentes tipos de flujo.

4. CUANTIFICACION DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA INGENIERIA DE LAS CORRIENTES DE DETRITOS

a) Comportamiento Mecánico

a.1. Aspectos Generales

Como se ha señalado anteriormente, las corrientes de detritos están constituidas por una mezcla de agua y sólidos de granulometría variada y amplia la cual comprende fracciones finas del tipo de arcillas, limos y arena fina, fracciones intermedias como arena y grava fina hasta gravas y bolones y bloques de rocas de dimensiones variables.

La concentración de sólidos, medida como el peso o volumen de éstos en

relación al total de la mezcla, varía conforme a la incidencia de los distintos factores que intervienen en la generación de la corriente. El peso específico o peso volumétrico de la masa depende de la concentración de los sólidos y del peso específico de la partículas y fragmentos rocosos.

Las mezclas sólido-líquidas puestas y mantenidas en movimiento por acción de la gravedad, presentan un comportamiento reológico caracterizado por una relación esfuerzo de corte-deformación, variable según el contenido de agua, contenido de sólidos, granulometría y tamaño de las partículas de sedimento, e incluso forma y angulosidad de las mismas. Estas mezclas pueden comportarse como materia fluida sin ofrecer resistencia al corte o como materia fluida plástica con una tensión de fluencia y alta viscosidad.

Según sus propiedades físicas y reológicas, un flujo de detritos puede presentar diferentes consistencias haciendo que aparezca como un movimiento turbulento en que el fluido y las partículas sólidas no muestran coherencia entre si, o bien, como un movimiento laminar o plástico de una masa líquida-sólida coherente. Estos flujos llevan asociados velocidades de unos pocos hasta varias decenas de m/s y volúmenes de material miles a cientos de miles de millones de m³. Son en general de corta duración (minutos a pocas horas) e intermitentes, pero son enormemente destructivos debido a la gran energía cinética que tienen.

a.2 Propiedades Físicas y Reológicas

Las propiedades que permiten caracterizar el comportamiento mecánico de las corrientes detríticas y de barro son básicamente, la concentración en peso o en volumen de los sólidos constitutivos de la mezcla, la densidad o peso específico global y la viscosidad; en ocasiones también se incluyen otros parámetros reológicos como el esfuerzo de corte de fluencia y el parámetro de Bingham para fluidos con comportamiento plástico.

- Concentraciones, Pesos Específicos y Densidades

De acuerdo con los antecedentes que ya han sido proporcionados en este informe, las concentraciones volumétricas de las corrientes detríticas varían en el rango del 50% al 80%, teniendo normalmente los sólidos un peso específico en el orden de 2,4 a 2,7 ton/m³ (se adopta en general es 2,6-2,65 ton/m³). El peso específico de la mezcla varía entre 1,5 y 2,3 ton/m³, siendo frecuente que el rango sea más estrecho: entre 1,8 y 2,0 ton/m³.

La relación entre concentración volumétrica (c_v), peso específico del agua (γ), peso específico de los sólidos (γ_s) y peso específico global de la corriente detrítica (γ_d), está dada por la siguiente ecuación:

$$\gamma_d = \gamma (1 - c_v) + c_v \gamma_s \quad (2.1)$$

La razón entre el peso específico de la corriente detrítica y el peso específico de los sólidos, o equivalentemente entre las densidades respectivas se expresa de acuerdo a lo anterior por:

$$\frac{\gamma_d}{\gamma_s} = \frac{\rho_d}{\rho_s} = \frac{1}{s} (1 - c_v) + c_v \quad (2.2)$$

donde ρ_d y ρ_s son respectivamente las densidades de la mezcla y de los sólidos. La densidad o peso específico relativo de los sólidos es s .

La máxima concentración que puede llegar a tener una mezcla sólido-líquida, constituye un límite físico importante que toman en cuenta diversos modelos desarrollados para este tipo de corrientes. Esta máxima concentración se obtiene cuando las partículas se aglutinan en seco de modo de rellenar al máximo los huecos formando una estructura compacta como sucede cuando la masa sedimenta liberando la mayor parte del agua.

Kang Zhichenz y Wan Yuzhang (1992), determinaron una relación entre la concentración volumétrica de un flujo detrítico y la concentración volumétrica máxima para corrientes observadas en la cuenca del Jiangjia en China, encontrando la siguiente regresión:

$$c_v = 1,067 c_{v \max} - 0,129; r^2 = 0,998 \quad (2.3)$$

- Composición Granulométrica de los Sedimentos

Los sedimentos de un flujo de detritos en cuanto a las fracciones de tamaño que la componen es semejante al del material que constituye la fuente. En general, la masa de sedimentos que se fluidiza y se mueve pendiente abajo puede estar constituida por fragmentos de roca grandes y medianas, clastos, grava, grava fina, arena gruesa y media, y finos del tipo de arena media, limos y arcilla. La proporción de estos materiales varía ampliamente en distintos casos e incluso puede producirse una disminución o aumento de algunas o todas las fracciones granulométricas a lo largo del recorrido de las corrientes, afectando su comportamiento hidráulico.

- Propiedades Reológicas y Leyes Constitutivas

Según lo consigna Takahashi (1991), son numerosos las investigaciones

realizadas para determinar las propiedades reológicas y leyes constitutivas de flujos sólido-líquidos hiperconcentrados, desde que se llevara a cabo el trabajo pionero efectuado en 1954 por Bagnold.

Bagnold introdujo el concepto de esfuerzo dispersivo que representa los efectos de choque interno entre las partículas sólidas sobre el flujo. La resistencia al escurrimiento resulta en tal caso del efecto combinado de fricción interna del fluido, de la fricción entre las partículas de sólido y de los choques interparticulares.

A partir de la definición del grupo adimensional conocido como número de Bagnold, se ha establecido el comportamiento reológico generalizado de las mezclas sólido-líquidas, relacionándolo con un parámetro adimensional de esfuerzo.

El número de Bagnold es proporcional a la derivada de la velocidad en la dirección vertical, siendo definido como sigue:

$$N = \frac{\rho_s \cdot \lambda^{1/2} \cdot \sigma_D^2}{\mu} \cdot \left(\frac{du}{dz} \right) \quad (2.4)$$

donde:

- N : Número de Bagnold
- ρ_s : Densidad de las partículas sólidas
- λ : Concentración lineal de sólidos
- D : Diámetro de las partículas sólidas
- μ : Viscosidad dinámica del fluido intersticial
- (du/dz) : Gradiente vertical de la velocidad

La concentración lineal de partícula, se define en función de la concentración volumétrica máxima y la concentración volumétrica de la mezcla como sigue:

$$\lambda = \left(\left(\frac{C_{vmax}}{C_v} \right)^{1/2} - 1 \right)^{-1} \quad (2.5)$$

El enfoque de Takahashi es uno de tantos que se han propuesto para caracterizar reológicamente este tipo de mezclas. Enos (1977), sin embargo, plantea la duda si acaso los ensayos experimentales y la teoría del flujo de pulpas en tuberías (de donde proviene gran parte del conocimiento actual del tema), es cuantitativamente extendible a flujos de detritos que incluyen también material granular grueso. Su contribución apunta a reunir y analizar antecedentes que permitan establecer las

fronteras entre comportamientos laminares y turbulentos, aplicables a flujos de detritos con fines geológicos y aplicaciones prácticas. En el caso de fluidos newtonianos, existen criterios establecidos para distinguir uno y otro tipo de comportamiento sólo a partir del número de Reynolds. En los fluidos que se comportan como plásticos ideales, en cambio, la estabilidad del flujo depende también del número de Bingham y aparentemente de otros factores.

Bradley y Mc Cutcheons (1985), señalan que en atención a que los modelos del fluido newtoniano no toman adecuadamente en cuenta los efectos de cohesión y fricción entre partículas que colisionan, han sido diversos los modelos reológicos propuestos para flujos de detritos, Entre ellos está el modelo pseudo-plástico o de la ley de potencia, y el modelo de Eyring aplicable principalmente a pulpas de sedimentos finos. El modelo de Takahashi, basado en la formulación de Bagnold es un modelo de fluido dilatante.

La viscosidad de mezclas sólidas líquidas ha sido también tema de numerosas investigaciones, partiendo del modelo de Einstein desarrollado para suspensiones diluidas:

$$\mu_d = \mu (1 + 2,5 c_v) \quad (2.7)$$

Para concentraciones superiores, pero que en todo caso no superan el 30%, Thomas, extendió la relación de Einstein haciéndola aplicable a partículas sólidas en el rango de tamaños de 0,1 a 20 micrones:

$$\mu_d = \mu (1 + 2,5C_v + 10,05c_v^2 + 0,062 \exp (\frac{1,875c_v}{1-1,595c_v})) \quad (2.8)$$

En esta expresión, una concentración límite de 30% conduce a una viscosidad de la mezcla equivalente a sólo 2,7 veces la del agua pura. Sin embargo, las estimaciones hechas por Whipple (1992) para flujos detríticos ocurridos en Black Canyon (Independence, California, EEUU), para concentraciones volumétricas entre el 66 y 74% llevan a una viscosidad de las mezclas, comprendidas entre 20.000 y 830.000 veces la del agua.

Costa (1988) plantea por su parte, que los flujos de detritos en general tienen viscosidades que superan largamente las 200 veces la del agua, con lo cual relaciones como las de Thomas verdaderamente no tendrían aplicación en los flujos de detritos.