

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD DE LOS
PARÁMETROS GEOTÉCNICOS EN EL DISEÑO GEOTÉCNICO DE
MUROS DE CONTENCIÓN, UTILIZANDO EL MÉTODO MONTE
CARLO**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

Ruben Rodrigo Vargas Tapia

ASESOR: Ing. Guillermo José Zavala Rosell

Lima, octubre de 2013

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Análisis de la influencia de la variabilidad de los parámetros geotécnicos en el diseño geotécnico de muros de contención, utilizando el Método Monte Carlo"

Área : Geotecnia - Investigación

Asesor : Ing. Guillermo José Zavala Rosell

Alumno : RUBÉN RODRIGO VARGAS TAPIA

Código : 2011.3221.3.412

Tema N° : 41

Fecha : Lima, 25 de setiembre de 2013



INTRODUCCIÓN

La adecuada estimación de los parámetros geotécnicos de los suelos de cimentación y de relleno (cohesión, ángulo de fricción y peso específico), constituye la base para el diseño geotécnico de muros de contención. Sin embargo, los procesos de estimación de los parámetros geotécnicos requeridos (ensayos de laboratorio, ensayos in-situ y/o estimaciones), no permiten obtener valores exactos de los parámetros requeridos.

Por lo general, en el diseño de muros de contención se emplean valores "promedio" o valores "más desfavorables" de los parámetros requeridos, empleándose un enfoque de diseño determinístico. Este enfoque de análisis no toma en cuenta la incidencia que pueda tener en el diseño, la variabilidad de los parámetros estimados.

Sin embargo, un enfoque probabilístico de diseño toma en cuenta la variabilidad de los parámetros requeridos, y mediante este enfoque se puede plantear el diseño en base a probabilidades de excedencia de acuerdo a la importancia del muro de contención.

Este trabajo de tesis pretende hallar expresiones que permitan estimar la variabilidad de los factores de seguridad en función de la variabilidad de los parámetros geotécnicos en el diseño de muros de contención en voladizo cimentado en suelo cohesivo y con relleno de suelo granular.

OBJETIVOS

El objetivo del trabajo de tesis consiste en contribuir a la cuantificación de la incertidumbre en el diseño geotécnico de muros de contención en voladizo con suelo cohesivo y relleno granular, mediante el desarrollo de expresiones numéricas que permitan estimar la variabilidad de los factores de seguridad (al volteo, al desplazamiento y por capacidad portante del terreno) en función de la variabilidad de los parámetros geotécnicos (ángulo de fricción interna del suelo retenido " ϕ ", peso específico del suelo retenido " γ " y cohesión en condiciones no drenadas del suelo de

fundación "su") y las características de los muros de contención, para condiciones de estabilidad estáticas, empleando el Método Monte Carlo.

Adicionalmente, se pretende documentar y describir los criterios básicos que permitan realizar diseños probabilísticos en muros de contención.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

Se realizará un análisis de la influencia de la variabilidad de los parámetros geotécnicos (ángulo de fricción interna del suelo retenido " ϕ ", peso específico del suelo retenido " γ " y cohesión en condiciones no drenadas del suelo de fundación " s_u ") en la variabilidad de los factores de seguridad de los muros de contención en voladizo con suelo de cimentación cohesivo y suelo de relleno granular, para lo cual se establecerán los criterios básicos de diseño probabilístico, enfocados al diseño de muros de contención. Acorde a los criterios planteados, se elaborarán modelos probabilísticos mediante el Método Monte Carlo, implementados en el software @Risk, en los que se emplearán distribuciones de probabilidad correspondientes a los parámetros geotécnicos para diversos escenarios de variabilidad, tomando como referencia las distribuciones de probabilidad planteadas en estudios publicados en revistas indexadas.

Con la finalidad de obtener una adecuada correlación en las expresiones numéricas buscadas, se prevé realizar dos tipos de análisis probabilísticos:

- Simulaciones Individuales, que corresponden a simulaciones en las que se introduce la distribución probabilística de una variable (γ , S_u ó ϕ), mientras que las otras dos variables permanecen constantes.
- Simulaciones de grupo, que corresponden a simulaciones en las que intervienen en el modelo las distribuciones probabilísticas de las tres variables en estudio.

Las simulaciones mediante el Método Monte Carlo (basadas en al menos 3'000,000 de simulaciones determinísticas), permitirán obtener expresiones que relacionen la variabilidad de los factores de seguridad, la variabilidad de los parámetros geotécnicos y las características de los muros de contención.

Para obtener las expresiones buscadas, se emplearán regresiones numéricas, tomando como premisa obtener expresiones sencillas y reducir al máximo el número de variables, sin que esto implique sacrificar la calidad de los resultados.

Cabe resaltar que debido a la diversidad de muros de contención y tipos de suelo, el presente trabajo toma como caso de estudio: muros de contención en voladizo, con suelo de cimentación cohesivo y suelo de relleno granular, así como una sobre-carga de diseño de 250 kg/cm^2 .



NOTA

Extensión máxima: 100 páginas.

RESUMEN

El presente trabajo de tesis realiza un análisis de la influencia de la variabilidad de los parámetros geotécnicos (ángulo de fricción interna del suelo retenido " φ ", peso específico del suelo retenido " γ " y cohesión en condiciones no drenadas del suelo de fundación " s_u ") en la variabilidad de los factores de seguridad de los muros de contención, planteando expresiones que permiten estimar variabilidad de los factores de seguridad mediante información de la variabilidad de los parámetros geotécnicos.

Para lo cual, se establecieron los criterios de diseño probabilístico; acorde a los criterios planteados, se elaboraron modelos probabilísticos mediante el Método Montecarlo, implementados en el software @Risk, en los que se emplearon distribuciones de probabilidad correspondientes a los parámetros geotécnicos para diversos escenarios de variabilidad.

Para obtener las expresiones buscadas, se emplearon regresiones, tomando como premisa obtener expresiones sencillas y reducir al máximo el número de variables, sin que esto implique sacrificar la calidad de los resultados. Con la finalidad de obtener una adecuada correlación en las expresiones numéricas buscadas, se realizaron 60'000,000 de iteraciones, comprendidos en dos tipos de análisis probabilísticos:

- Simulaciones Individuales, que corresponden a simulaciones en las que se introduce la distribución probabilística de una variable (γ , S_u ó Φ), mientras que las otras dos variables permanecen constantes.
- Simulaciones de grupo, que corresponden a simulaciones en las que intervienen en el modelo las distribuciones probabilísticas de las tres variables en estudio

Asimismo, en el Anexo IV, se presenta un ejemplo de aplicación en el que se determinan factores de seguridad de diseño acordes a una "probabilidad de falla aceptable" definida y a información de la variabilidad de los parámetros, empleando las expresiones planteadas.

Debido a la diversidad de muros de contención y tipos de suelo, el presente trabajo toma como caso de estudio: muros de contención en voladizo, con suelo de cimentación cohesivo y suelo de relleno granular, así como una sobre-carga de diseño de 250 kg/cm².

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi fuente de fuerza
y fortaleza en cada instante de mi vida.

A mis padres, Rubén y Gladys,
por su sabiduría, confianza, comprensión
y apoyo incondicional.

A mis hermanos, Danny y Miguel, por su
solidaridad, tolerancia y compañía incondicional.

A ti, Pilaruca, que desde el cielo siempre
me recuerdas que ante cualquier dificultad ...
“peores cosas pasan en la guerra, hasta
caballos mueren con herraje nuevo”.

A mis tíos y primos, por su confianza y por
enseñarme que lo más importante es la familia.

A mi asesor y amigo, por su apoyo
constante y grandes enseñanzas.

A ti, futura compañera de la vida...

Rubén Rodrigo



Índice General

1	INTRODUCCIÓN	7
2	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	2
2.1	Antecedentes.....	2
2.2	Justificación	2
3	OBJETIVOS	4
3.1	Objetivo general	4
3.2	Objetivos específicos.....	4
4	ALCANCES	5
5	MARCO TEÓRICO	6
5.1	Conceptos Básicos de Incertidumbre y variabilidad	6
5.1.1	Incertidumbre natural.....	6
5.1.2	Incertidumbre epistémica	7
5.2	Factores de Seguridad, Confiabilidad y Probabilidad de Falla	8
5.2.1	Confiabilidad	8
5.2.2	Factor de Seguridad en el método determinista.....	9
5.2.3	Índice de Confiabilidad	9
5.2.4	Índice de Confiabilidad del Factor de Seguridad	11
5.3	Descripción de los principales métodos probabilísticos	12
5.3.1	Método del Primer Orden Segundo Momento (FOSM).....	13
5.3.2	Método del Segundo Orden Segundo Momento (SOSM).....	14
5.3.3	Método de la Estimación Puntual	14
5.3.4	Método de Hasofer - Lind	14
5.4	Método Monte Carlo	14
5.4.1	Antecedentes del Método Monte Carlo	15
5.4.2	Método Monte Carlo	15
5.4.3	Muestreo aleatorio.....	17
6	METODOLOGÍA	22
6.1	Caso de estudio.....	22
6.2	Pre-dimensionamiento del muro de contención	23
6.3	Diseño Determinístico del muro de contención	25
6.3.1	Fuerzas actuantes consideradas en el diseño	25
6.3.2	Estabilidad de muros de contención en voladizo	29

6.4	Modelo Probabilístico	39
6.4.1	Descripción.....	39
6.4.2	Variabilidad de los datos de ingreso.....	40
6.4.3	Simulaciones realizadas	42
7	RESULTADOS.....	46
7.1	Resultados de los diseños determinísticos	47
7.2	Resultados del modelo probabilístico	51
7.2.1	Nomenclatura empleada en los resultados de simulaciones individuales y de grupo	52
7.2.2	Resultados y Regresiones de Simulaciones Individuales	54
7.2.3	Resultados y Regresiones de Simulaciones de Grupo	71
8	CONCLUSIONES.....	77
9	BIBLIOGRAFÍA.....	79

Lista de Cuadros

Cuadro 6.3-1	: Fuerzas de gravedad actuantes (que producen momentos resistentes) ...	27
Cuadro 6.3-2	: Empuje de suelos	28
Cuadro 6.3-3	: Empuje de suelos	29
Cuadro 6.4-1	: Rangos de valores de coeficientes de variación de los parámetros geotécnicos en estudio	41
Cuadro 6.4-2	: Combinaciones de Coeficientes de Variación para las Simulaciones de Grupo.....	45
Cuadro 7.1-1	: Criterios de estabilidad que gobiernan el diseño determinístico – H=4m ..	49
Cuadro 7.1-2	: Criterios de estabilidad que gobiernan el diseño determinístico – H=5m ..	50
Cuadro 7.1-3	: Criterios de estabilidad que gobiernan el diseño determinístico – H=6m ..	50
Cuadro 7.1-4	: Criterios de estabilidad que gobiernan el diseño determinístico – H=7m ..	50

Lista de Gráficos

Gráfico 5.1-1	: Incertidumbre Natural.....	7
Gráfico 5.1-2	: Incertidumbre Epistémica	8
Gráfico 5.2-1	: Distribución de densidad de Cargas y Resistencias	10
Gráfico 5.2-2	: Definición del Índice de Confiabilidad.....	11
Gráfico 5.4-1	: Valores correspondientes al muestreo de una distribución normal	17
Gráfico 5.4-2	: Función de distribución acumulada	18

Gráfico 5.4-3 : Deficiencias en el muestreo Monte Carlo.....	19
Gráfico 5.4-4 : Estratificación en el muestreo Latino Hipercúbico	20
Gráfico 6.2-1 : Pre – dimensionamiento del muro de contención	24
Gráfico 6.3-1 : Fuerzas actuantes consideradas en el diseño	26
Gráfico 6.3-2 : Estabilidad al volteo	30
Gráfico 6.3-3 : Estabilidad al desplazamiento.....	33
Gráfico 6.3-4 : Verificación por capacidad portante.....	34
Gráfico 6.3-5 : Área Efectiva debido a la excentricidad	36
Gráfico 6.3-6 : Estabilidad ante una falla global	39
Gráfico 6.4-1 : Esquema ilustrativo – Simulaciones Individuales	43
Gráfico 6.4-2 : Esquema ilustrativo – Simulaciones de Grupo	44
Gráfico 7.1-1 : Resumen del Diseño Determinístico H=4.....	48
Gráfico 7.1-2 : Resumen del Diseño Determinístico H=5.....	48
Gráfico 7.1-3 : Resumen del Diseño Determinístico H=6.....	48
Gráfico 7.1-4 : Resumen del Diseño Determinístico H=7.....	49
Gráfico 7.2-1 : cv_{vy} vs cv_{vy} (Calculado)	56
Gráfico 7.2-2 : $cv_{v\phi}$ vs $cv_{v\phi}$ (Calculado).....	57
Gráfico 7.2-3 : cv_{dy} vs cv_{dy} (Calculado)	59
Gráfico 7.2-4 : $cv_{d\phi}$ vs $cv_{d\phi}$ (Calculado)	60
Gráfico 7.2-5 : cv_{dsu} vs cv_{dsu} (Calculado)	61
Gráfico 7.2-6 : cv_{cey} vs cv_{cey} (Calculado).....	63
Gráfico 7.2-7 : $cv_{ce\phi}$ vs $cv_{ce\phi}$ (Calculado) - para $Su=10$ ton/m ²	64
Gráfico 7.2-8 : $cv_{ce\phi}$ vs $cv_{ce\phi}$ (Calculado) - para $Su \geq 15$ ton/m ²	65
Gráfico 7.2-9 : cv_{cesu} vs cv_{cesu} (Calculado).....	66
Gráfico 7.2-10 : cv_{ciy} vs cv_{ciy} (Calculado).....	68
Gráfico 7.2-11 : $cv_{ci\phi}$ vs $cv_{ci\phi}$ (Calculado)	69
Gráfico 7.2-12 : cv_{cisu} vs cv_{cisu} (Calculado)	70
Gráfico 7.2-13 : cv_v vs cv_v (Calculado).....	72
Gráfico 7.2-14 : cv_d vs cv_d (Calculado).....	73
Gráfico 7.2-15 : cv_{ce} vs cv_{ce} (Calculado)	74
Gráfico 7.2-16 : cv_{ci} vs cv_{ci} (Calculado).....	76

1 INTRODUCCIÓN

El diseño geotécnico de muros de contención se basa en los parámetros geotécnicos de los suelos que interactúan con él (suelo retenido y suelo de fundación). La naturaleza de los procesos de estimación de dichos parámetros geotécnicos no permite obtener valores exactos de estos, pues existe variabilidad de tipo natural y epistémica.

De acuerdo a los enfoques tradicionales de diseño de muros de contención, se requiere emplear valores puntuales de los parámetros geotécnicos (por lo general valores “promedio”, o valores “más desfavorables”), realizando un análisis determinístico, el cual no toma en cuenta la variabilidad de los parámetros y la influencia que podría tener esta en el desempeño de la estructura diseñada.

Sin embargo, si se realizara un diseño probabilístico, podría incorporarse en el análisis la variabilidad de los parámetros involucrados, obteniendo como respuesta una curva de probabilidad en lugar de una respuesta única (respuesta que se obtiene mediante un diseño determinístico).

Debido a que cada vez se requiere proyectar estructuras más seguras y menos costosas, los análisis probabilísticos constituyen una alternativa adecuada, pues permiten optimizar los diseños en función de la importancia de la estructura, las consecuencias de falla, los costos constructivos, etc.

En el presente trabajo de tesis, se expondrá la metodología de diseño probabilístico y asimismo se presentarán expresiones que permitan desarrollar un análisis probabilístico en base a un análisis determinístico, para muros de contención en voladizo con suelo cohesivo y relleno granular.

No obstante, la metodología de análisis presentada en los siguientes acápite puede considerarse válida para cualquier tipo de muro de contención y cualquier tipo de suelo.

2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

2.1 Antecedentes

El diseño de muros de contención requiere el conocimiento de parámetros geotécnicos, tales como el ángulo de fricción interna " ϕ ", peso específico " γ ", cohesión " c ", etc., de los suelos de fundación y de relleno, para poder dimensionar el muro requerido.

La obtención de parámetros geotécnicos proviene de ensayos en campo, ensayos de laboratorio y/o estimaciones. La naturaleza de los procesos de obtención de los parámetros requeridos hace que no se cuenten con valores exactos ni únicos de los parámetros previamente mencionados, es decir, los valores de los parámetros poseen variabilidad, la que depende de las condiciones, tipos de ensayos y/o estimaciones realizadas.

Generalmente, en el diseño de muros de contención, se realiza un diseño determinístico, el cual considera "valores promedio" o "valores más desfavorables". Este enfoque no toma en cuenta la incidencia que tiene el grado de variabilidad de los parámetros en el diseño final y no permite evaluar adecuadamente el diseño de acuerdo a la importancia que el muro de contención tenga.

Sin embargo, si se realiza el diseño teniendo en cuenta la variabilidad de los parámetros, se obtendrán como resultados valores probabilísticos, los cuales estarán directamente influenciados por la variabilidad de dichos parámetros. Este tipo de resultado permite tomar decisiones en base a probabilidades de excedencia de acuerdo a la importancia del muro de contención.

2.2 Justificación

El diseño de muros de contención posee muchas fuentes de incertidumbre. Una fuente de incertidumbre importante proviene de la estimación de los parámetros geotécnicos para realizar el diseño geotécnico del muro, en el cual, generalmente la altura se encuentra definida, debiendo dimensionarse el ancho de la base (en función a factores de seguridad mínimos) para que el muro resista el volteo y el deslizamiento ocasionados por el empuje de los suelos y la sobrecarga, así como satisfacer las condiciones de cimentación.

En el diseño geotécnico de muros de contención, la variabilidad de los parámetros involucrados en el diseño determinará la variabilidad de los factores de seguridad. La variabilidad de dichos factores de seguridad se verá influenciada por la variabilidad de los parámetros involucrados en mayor o menor medida, acorde a la importancia de dichos parámetros.

La cuantificación de la variabilidad de los factores de seguridad mediante un análisis probabilístico permite optimizar el diseño de muros de contención, pues al estimar la función de densidad de los factores de seguridad, se pueden realizar análisis costo-beneficio asociados a los costos de construcción y las consecuencias de la falla de un muro de contención.

Adicionalmente, este tipo de análisis permiten tomar decisiones en la etapa de diseño, por ejemplo, ante un panorama de gran variabilidad, el diseñador puede solicitar ensayos adicionales en la estimación de ciertos parámetros, con el fin de disminuir la variabilidad en los factores de seguridad, con los nuevos valores podrá sustentar el empleo de un valor inferior de factor de seguridad, dando como resultado una disminución de costos en la construcción.

Debido a la diversidad de muros de contención y tipos de suelo, el presente trabajo tomó como caso de estudio muros de contención en voladizo, con suelo de cimentación cohesivo y suelo de relleno granular, empleando distribuciones de probabilidad de los parámetros requeridos para diversos escenarios, y realizando análisis probabilísticos mediante el Método Monte Carlo.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

El objetivo general del trabajo de tesis es contribuir a la cuantificación de la incertidumbre causada por la variabilidad de los parámetros geotécnicos en el diseño de muros de contención en voladizo con suelo de cimentación cohesivo y suelo relleno granular, mediante expresiones que permitan estimar la variabilidad de los factores de seguridad, en función de la variabilidad de parámetros geotécnicos y las características del muro de contención.

3.2 Objetivos específicos

- Describir y documentar criterios básicos que permitan realizar diseños probabilísticos mediante el Método Monte Carlo en diseños de muros de contención.
- Obtener expresiones que permitan estimar y analizar numéricamente la influencia de la variabilidad del ángulo de fricción interna del suelo " ϕ " en el diseño de la base de los muros de contención en voladizo con suelo de cimentación cohesivo y suelo relleno granular.
- Obtener expresiones que permitan estimar y analizar numéricamente la influencia de la variabilidad del peso específico del suelo " γ " en el diseño de la base de los muros de contención en voladizo con suelo de cimentación cohesivo y suelo relleno granular.
- Obtener expresiones que permitan estimar y analizar numéricamente la influencia de la variabilidad de la cohesión " s_u " en el diseño de la base de los muros de contención en voladizo con suelo de cimentación cohesivo y suelo relleno granular.

4 ALCANCES

Se estudiará la influencia de la variabilidad de los parámetros: ángulo de fricción interna " φ ", peso específico " γ " y cohesión en condiciones no drenadas " su ", en el diseño geotécnico de muros de contención en voladizo con suelo de cimentación cohesivo y suelo de relleno granular, utilizando el Método Monte Carlo. El análisis se hará utilizando distribuciones de probabilidad de los parámetros previamente mencionados para diversos escenarios de variabilidad, tomando como referencia las distribuciones de probabilidad planteadas en estudios publicados en revistas internacionales, obteniendo expresiones mediante que permitan estimar la influencia de la variabilidad de los parámetros de estudio en la variabilidad de los factores de seguridad correspondientes al diseño de la base de los muros de contención previamente planteados. Se presentarán regresiones y gráficos que relacionen la variabilidad de los parámetros y la variabilidad de los factores de seguridad al volteo, al deslizamiento y por capacidad portante.

Asimismo, se presentará una descripción de los criterios básicos en el diseño geotécnico de muros de contención, realizando una comparación entre los resultados de diseños probabilísticos y determinísticos, determinando la diferencia que existe entre ambos enfoques de diseño.

5 MARCO TEÓRICO

El diseño de muros de contención (y de obras civiles en general) requiere que la estructura se comporte adecuadamente para los fines con los que fue concebida, debiendo cumplir, dentro de unos límites razonables, con requisitos de funcionalidad, seguridad, resistencia y economía.

Con el fin de cumplir con las exigencias previamente mencionadas, generalmente los diseñadores plantean diseños basados en parámetros promedio o en algunos casos con los valores más desfavorables. Mediante este planteamiento se enfoca el comportamiento de la estructura y las fuerzas que interactúan con ella desde un punto de vista determinístico, asumiendo que si las condiciones iniciales son conocidas con precisión, y mediante un exhaustivo análisis de las leyes naturales, pueden predecirse exactamente las condiciones finales (Baecher, 2003).

Sin embargo, la aleatoriedad y a la incertidumbre en los parámetros y métodos de análisis que se utilizan como herramientas para el diseño, hacen que el diseño no pueda ser predicho con exactitud.

5.1 Conceptos Básicos de Incertidumbre y variabilidad

Se puede definir a la incertidumbre, para fines prácticos, como el grado de inseguridad y/o variabilidad que se cuenta en la estimación de parámetros de ingreso y/o salida en un diseño. Cabe resaltar que la incertidumbre puede ser cuantificada estadísticamente mediante el uso de probabilidades.

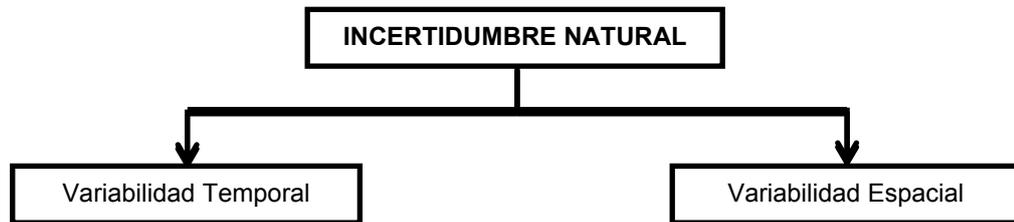
De acuerdo a Baecher (Baecher, 2003), la incertidumbre en la ingeniería geotécnica puede clasificarse en:

- Incertidumbre natural
- Incertidumbre epistémica

5.1.1 Incertidumbre natural

La incertidumbre natural está asociada con la aleatoriedad inherente de los procesos naturales que pueden tomar lugar en un mismo sitio (variabilidad temporal), aquella variabilidad que puede presentarse en diferentes lugares en un

mismo tiempo determinado (variabilidad espacial) y asimismo la variabilidad que resulta de la combinación de la variabilidad temporal y la variabilidad espacial.



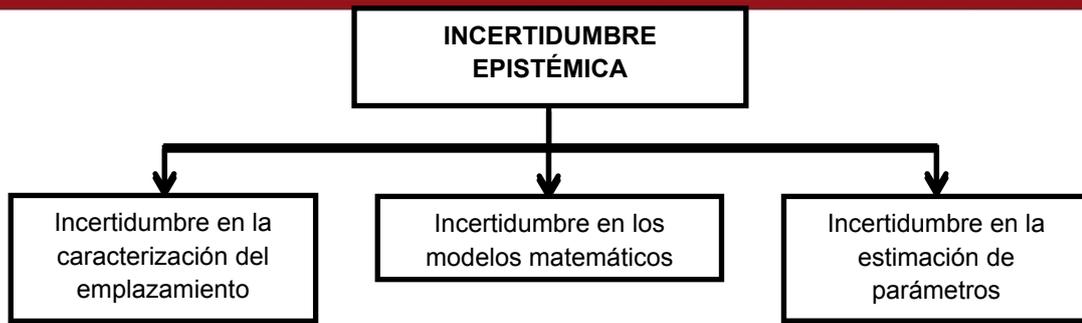
Fuente: Baecher,2003

Gráfico 5.1-1 : Incertidumbre Natural

5.1.2 Incertidumbre epistémica

La incertidumbre epistémica está asociada a la falta de datos, a la ausencia de información acerca de eventos o procesos y sobre todo a la falta de entendimiento de las leyes físicas que limitan el adecuado modelamiento del mundo real. Esta puede dividirse en:

- Incertidumbre en la caracterización del emplazamiento: es resultado de los errores, inconsistencia y heterogeneidad en los datos de exploración, así como la inadecuada representatividad de las muestras debido a restricciones de tiempo, espacio y presupuesto.
- Incertidumbre de los modelos matemáticos: refleja la incapacidad de modelos numéricos utilizados en la representación de los fenómenos en estudio; asimismo en este ítem se incluye la inhabilidad del diseñador en la elección de un modelo adecuado.
- Incertidumbre en la estimación de los parámetros: refleja la incertidumbre en la estimación de los parámetros requeridos para alimentar los modelos matemáticos a emplear. Resulta de la incertidumbre en la determinación de los parámetros a partir de los datos de campo, correlaciones y/o calibraciones.



Fuente: Baecher, 2003

Gráfico 5.1-2 : Incertidumbre Epistémica

5.2 Factores de Seguridad, Confiabilidad y Probabilidad de Falla

5.2.1 Confiabilidad

La confiabilidad puede definirse como la probabilidad que tiene una estructura para desempeñar las funciones para las que fue concebida, es decir, es la probabilidad del evento opuesto a la falla (Crespo, 2002).

$$\alpha = 1 - P(f)$$

Donde:

- α : Confiabilidad.
- $P(f)$: Probabilidad de falla.

Debido a que se define la confiabilidad de una estructura en función de la probabilidad de falla, es importante definir el significado que se le da al término falla en términos ingenieriles.

Para los fines del presente trabajo, puede definirse la falla como el estado en el cual una obra no puede cumplir la función para la que fue concebida, es decir, no es necesario que la estructura colapse para considerar que la obra falló, pues por ejemplo, si un muro de contención se deforma más allá de lo concebido, no podrá desempeñar las funciones para las que fue construido, por lo que puede considerarse que la estructura ha fallado.

5.2.2 Factor de Seguridad en el método determinista

En el enfoque de diseño determinista, el parámetro que expresa la condición de riesgo de una estructura es el Factor de Seguridad (FS), el cual se define como el cociente de la resistencia de una estructura entre un valor estimado de fuerzas o efectos para una determinada condición de estabilidad, sea deslizamiento, volcamiento o hundimiento en el caso de muros de contención (Crespo, 2002).

$$FS = \frac{\text{Resistencia}}{\text{Fuerzas Actuantes}}$$

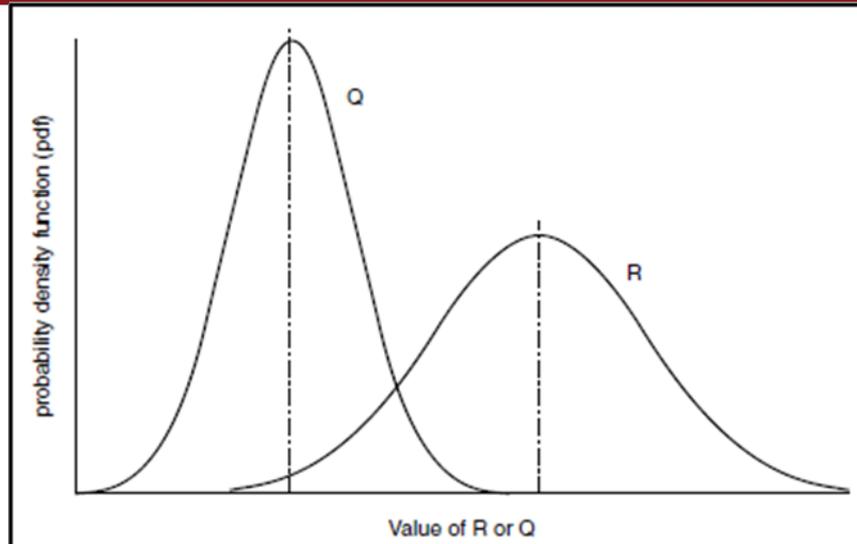
Una limitación del factor de seguridad radica en el hecho de no tomar en cuenta la variabilidad de los parámetros de ingreso, es decir, generalmente se adopta el mismo factor de seguridad indistintamente para casos en los que se cuentan con estimaciones de parámetros con baja variabilidad y en casos en que la variabilidad de los parámetros es grande.

Sin embargo, existen diseñadores que utilizan factores de seguridad mayores cuando estiman que la variabilidad de sus parámetros de ingreso es mayor. Este método puede considerarse válido, sin embargo, usualmente se realiza de manera intuitiva, pues la incertidumbre no es cuantificada. Esto hace que los nuevos valores de FS no puedan ser sustentados.

En general, en el diseño determinista, la incertidumbre que engloba el diseño ha sido manejada mediante la inclusión de factores de seguridad. Sin embargo la importancia y costo de algunos proyectos exigen que la incertidumbre deba ser manejada de una manera más rigurosa (Hidalgo, 2011).

5.2.3 Índice de Confiabilidad

Si se tiene en cuenta que los valores de las fuerzas actuantes y las resistencias en una estructura no son determinísticos, podemos afirmar que están descritos mediante funciones de densidad de probabilidad, como lo muestra el gráfico 5.2-1.



Fuente: Baecher, 2003

Gráfico 5.2-1 : Distribución de densidad de Cargas y Resistencias

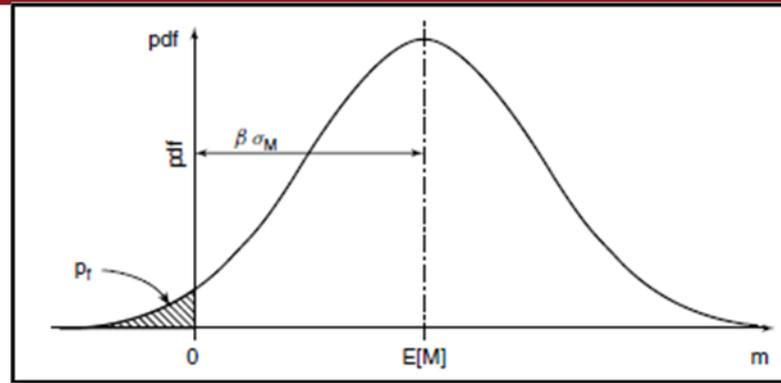
Se define el margen de seguridad como la diferencia entre la resistencia y las cargas impuestas:

$$MS = R - Q$$

Donde:

- MS : Margen de Seguridad.
- R : Valor medio de Resistencias
- Q : Valor medio de Cargas

Como se aprecia en la figura anterior, el hecho que los valores medios de resistencia sean mayores que los valores medios de cargas impuestas, no implica que no existan probabilidades de que ocurra lo contrario. Para poder cuantificar esta probabilidad, se define el índice de confiabilidad β , como se muestra en el gráfico 5.2-2.



Fuente: Baecher, 2003

Gráfico 5.2-2 : Definición del Índice de Confiabilidad

El índice de confiabilidad (β) se define como la distancia del margen medio de seguridad hasta su valor crítico ($MS=0$), en términos de su desviación estándar. Este puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{R - Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}}$$

Donde:

- β : índice de Confiabilidad
- R : Valor medio de las resistencias
- Q : Valor medio de las cargas
- σ_R : Desviación estándar de las resistencias
- σ_Q : Desviación estándar de las cargas

5.2.4 Índice de Confiabilidad del Factor de Seguridad

Por lo general el análisis del parámetro β se relaciona con la distribución probabilística de las fuerzas actuantes y la distribución de las resistencias de la estructura. Sin embargo, debido a que tanto las fuerzas como las resistencias se relacionan mediante el factor de seguridad, el hecho de analizar la distribución probabilística de los factores de seguridad para estimar la probabilidad de falla (analizado el parámetro β) simplifica el proceso, pues se analiza solamente una distribución de probabilidad en lugar de analizar dos.

Si asume que la condicionante de la falla de una estructura es que el factor de seguridad asociado a esta sea menor a uno, puede definirse el margen de seguridad de este como:

$$MS = FS - 1$$

Donde:

- MS : Margen de Seguridad.
- FS : Factor de Seguridad

Asimismo, puede definirse el índice de confiabilidad β , tomando en cuenta el factor de seguridad, mediante la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{FS - 1}{\sigma_{FS}}$$

Con lo que, si se estima la distribución de densidad del Factor de Seguridad (FS), podrá estimarse la probabilidad de falla asociada a un fenómeno en análisis.

Mediante este procedimiento, a contraparte del análisis determinístico, el diseñador puede incrementar el FS de acuerdo a la variabilidad que presenta la función de densidad del factor de seguridad (causado por la incertidumbre en el diseño), de modo tal que pueda sustentar el valor del factor de seguridad adoptado.

5.3 Descripción de los principales métodos probabilísticos

Debido a que los modelos matemáticos utilizados en el diseño geotécnico implican operaciones no lineales con los parámetros de ingreso, se requieren metodologías adicionales para estimar la distribución de probabilidades de la variable dependiente (en nuestro caso el FS), conocida la distribución de probabilidades de las variables dependientes.

Entre los métodos probabilísticos más conocidos, se tienen:

- Método del Primer Orden Segundo Momento (FOSM)
- Método del Segundo Orden Segundo Momento (SOSM)
- Método de la Estimación Puntual
- Método de Hasofer - Lind

- Método Monte Carlo

5.3.1 Método del Primer Orden Segundo Momento (FOSM)

El método del Primer Orden Segundo Momento (FOSM por sus siglas en inglés) emplea el desarrollo de una función en series de Taylor, utilizando solamente el primer término debido a que asume que el valor de “ $x_i - \mu$ ” es pequeño (donde x_i es la variable aleatoria y μ es el valor esperado de la variable), por lo que los valores de sus potencias serán mucho más pequeñas aún y por lo tanto pueden ignorarse. (Prada, 2011)

Este método considera que el valor esperado de la respuesta es función de los valores esperados de las variables de ingreso, como se indica en la siguiente expresión:

$$E[F] = f(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n)$$

De una manera general, el método considera que el valor de la desviación estándar de la respuesta viene dado por la siguiente expresión:

$$\sigma^2[F] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\left. \frac{\partial F}{\partial X_i} \right|_{E[X_i]} \frac{\partial F}{\partial X_j} \Big|_{E[X_j]}}{\frac{\partial F}{\partial X_i} \Big|_{E[X_i]} \frac{\partial F}{\partial X_j} \Big|_{E[X_j]}} \sigma[X_i] \sigma[X_j] \rho_{XF}[X_i X_j]$$

Sin embargo, si se asume que las variables de ingreso son estadísticamente independientes, la expresión anterior puede reducirse a:

$$\sigma^2[F] = \sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial F}{\partial X_i} \right|_{E[X_i]} \right)^2 \sigma^2[X_i]$$

Con las expresiones anteriores puede estimarse el valor esperado y la desviación estándar de la función aleatoria de respuesta, en función de las funciones aleatorias de ingreso.

Para funciones lineales, este método resulta exacto numéricamente, debido a que a partir del segundo término del desarrollo de Taylor, los valores serían cero, los que coincidirían con la hipótesis que posee este método. Sin embargo para funciones no lineales, este método es solamente aproximado numéricamente, debido a que

los valores del desarrollo de Taylor a partir del segundo término no son cero. (El-Ramly, 2003)

5.3.2 Método del Segundo Orden Segundo Momento (SOSM)

Este método es similar al Método de Primer Orden Segundo Momento (FOSM), debido a que ambos toman en cuenta el desarrollo de Taylor, sin embargo el método SOSM utiliza los dos primeros términos del desarrollo de Taylor (el FOSM solamente toma el primer término).

Debido a la incorporación del segundo término, las expresiones de cálculo son mucho más complejas, incluyendo un esfuerzo en el cálculo muy grande, el cual no siempre es justificado, debido a que no se tienen diferencias significativas con el FOSM. (Baecher, 2003)

5.3.3 Método de la Estimación Puntual

Este método fue propuesto por Rosenblueth en 1975, se basa en obtener los momentos de la función de desempeño mediante a evaluación de un conjunto de puntos discretos elegidos. Utiliza el método de la cuadratura de Gauss para elegir los puntos discretos y evaluar la integral mediante ellos.

Este método tiene esfuerzos de cálculo muy grandes cuando se cuentan con muchas variables aleatorias de ingreso, pues se tendrán 2^n combinaciones de la función de respuesta, a partir de las cuales pueden calcularse el valor esperado y la desviación estándar de la función de respuesta. (Prada, 2011)

5.3.4 Método de Hasofer - Lind

Hasofer y Lind propusieron en 1974 una mejora al método FOSM, basándose en una interpretación geométrica del índice de confiabilidad β , como una medida de la distancia entre el pico de la función multivariada de los parámetros variables y una función que define la probabilidad de falla. A este método generalmente se le conoce por el acrónimo FORM.

5.4 Método Monte Carlo

El Método Monte Carlo (llamado también simulación Monte Carlo) permite determinar la distribución probabilística de la variable aleatoria dependiente,

mediante la generación de números aleatorios basados en las variables aleatorias de ingreso.

5.4.1 Antecedentes del Método Monte Carlo

Se atribuye la creación del Método Monte Carlo a Stanislaw Ulam y a John von Neumann en la década de 1940, quienes aplicaron los conceptos generales del método en la investigación de la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial. La primera aplicación directa del método se dio en la solución de las ecuaciones integro-diferenciales que gobiernan la absorción, dispersión y fisión de neutrones.

En esta investigación, el objetivo del uso del método consistía en probar las miles de posibilidades probables en el fenómeno de acuerdo a muestreos de variables aleatorias de ingreso, con el fin de totalizar las posibilidades y estimar convenientemente la conducta del proceso en investigación.

El nombre “Monte Carlo” proviene de Mónaco, conocida como “la capital del juego del azar”, debido a que el juego de la ruleta era considerada como el primer generador de números aleatorios.

Se considera que el desarrollo sistemático de los conceptos fundamentales del método se dieron en 1948 en el trabajo de Harris y Kahn, sin embargo a partir de 1970 con el desarrollo computacional, se da una mayor divulgación del método y se utiliza en investigaciones y trabajos multidisciplinarios.

5.4.2 Método Monte Carlo

El concepto básico de este método parte del concepto básico de probabilidad, debido a que plantea conocer la probabilidad de ocurrencia de un evento, realizando el experimento un número suficiente de veces, determinando la variable aleatoria dependiente como una función de densidad de los resultados obtenidos en los “experimentos” realizados. (Crespo, 2002)

Este método considera que la variable dependiente estudiada se da mediante:

$$F = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Conociendo la distribución de probabilidad de las variables aleatorias de ingreso (X_1, X_2, \dots, X_n), se muestrean aleatoriamente valores de las variables aleatorias de ingreso, y se evalúa determinísticamente la variable dependiente “F”. El proceso previamente explicado se repite un número suficientemente grande de veces para conseguir la convergencia de la distribución de probabilidad de la variable aleatoria dependiente. (Hidalgo, 2011)

La aplicación del Método Monte Carlo es eficiente solamente cuando se cuentan con las herramientas computacionales para efectuar grandes volúmenes de cálculos numéricos, debido a que se consigue una mejor aproximación cuando se incrementan el número de simulaciones realizadas. Aproximadamente, de acuerdo a la teoría del Límite Central, puede considerarse que el error es de $\frac{1}{\sqrt{n}}$, siendo “n” el número de simulaciones.

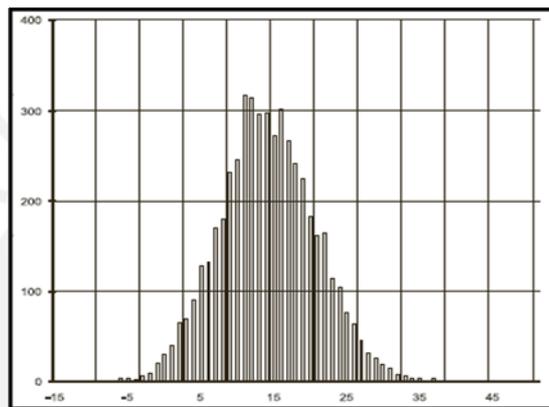
En la actualidad existen muchos software que implementan la aplicación del Método Monte Carlo a hojas de cálculo convencionales, sin embargo, deben tomarse algunas precauciones en el uso de estas. Algunas de las principales se listan a continuación:

- Debido a que el método se basa en la gran generación de números aleatorios, debe tomarse en cuenta que el proceso de generación de estos sea eficiente. Recientemente se aconseja utilizar el Método de Muestreo Latino Hipercúbico, el cual se describe más adelante.
- En muchos casos, cuando se adoptan distribuciones aleatorias para las variables de ingreso, los límites se encuentran en valores infinitos, por lo que los valores de la distribución adoptada deben truncarse en límites coherentes, para evitar simulaciones que consideren pesos negativos por ejemplo.
- Definir correlaciones adecuadas entre variables de ingreso cuando se tenga datos acerca de estos.
- Definir un número adecuado de simulaciones. Algunas publicaciones sugieren que para estimativos preliminares se utilicen al menos 1000 simulaciones, y que para estudios finales, se utilicen al menos 5000 simulaciones. Cabe resaltar que un número superior de simulaciones implica incrementar el tiempo de simulaciones, el cual en muchos casos no es justificado, debido a que no se encuentran variaciones significativas.

- Si la simulación es muy grande, puede analizarse el caso de trabajar con múltiples procesadores para reducir notoriamente los tiempos de simulación.

5.4.3 Muestreo aleatorio

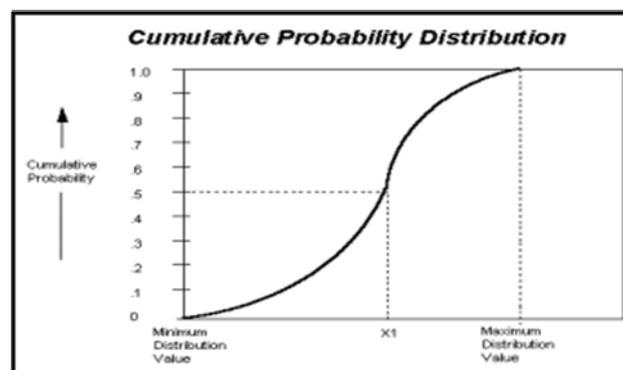
El muestreo es el proceso por el que se recolecta una serie de valores aleatorios a partir de las funciones de densidad de las variables aleatorias independientes. Si se llevan a cabo las suficientes iteraciones en el proceso de muestreo, estos valores deben seguir aproximadamente el patrón de la distribución de ingreso (Palisade, 2010), como se muestra la gráfica 5.4-1.



Fuente: Crespo, 2002

Gráfico 5.4-1 : Valores correspondientes al muestreo de una distribución normal

Por lo general, la mayoría de métodos de muestreo aleatorio se basan en la distribución acumulada correspondiente a la variable aleatoria de ingreso, debido a que esta posee una escala de 0 a 1 en el eje Y, como muestra el gráfico 5.4-2.



Fuente: Palisade, 2010

Gráfico 5.4-2 : Función de distribución acumulada

Es importante resaltar la importancia de tener la escala 0 -1 en el eje Y de la distribución de probabilidad acumulada, debido a que es relativamente fácil obtener valores aleatorios entre 0 y 1 (con igual probabilidad de que el valor que se tome se encuentre en cualquier parte del rango), de modo que este valor se utilice para seleccionar un valor de la curva acumulada. (Palisade, 2010)

Debido a que la forma de la curva se basa en la forma de la distribución de probabilidad, es más probable que se tomen como muestra valores que pertenecen a un intervalo con mayor probabilidad de ocurrencia. El intervalo con más probabilidades de ocurrencia se refleja en la curva acumulada en los sectores en que más inclinada esta se encuentra. (Palisade, 2010)

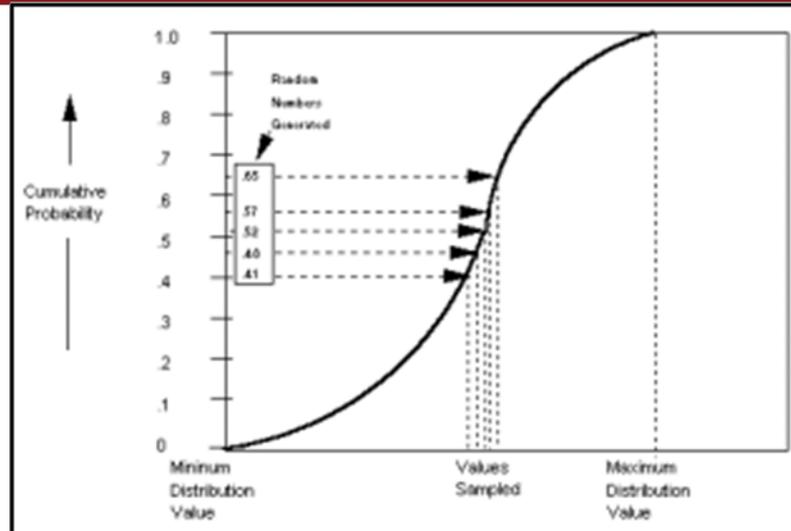
Los métodos más utilizados en el método Monte Carlo son:

- Muestreo Monte Carlo (el cual no debe confundirse con el Método Monte Carlo)
- Muestreo Latino Hipercúbico

5.4.3.1 Muestreo Monte Carlo

El muestreo Monte Carlo utiliza el concepto de generación de muestras aleatorias expuesto en el acápite anterior, con la característica que la generación de valores aleatorios en el rango 0 a 1 se encuentra en cualquier ubicación del rango “Y” de la distribución acumulada. Con esta metodología, si se generan suficientes iteraciones, la técnica de muestreo reflejará la forma de la distribución de ingreso.

Este método de muestreo presenta un problema de agrupamiento para un número reducido de iteraciones, como ejemplo se muestra la gráfica 5.4-3.



Fuente: Palisade, 2010

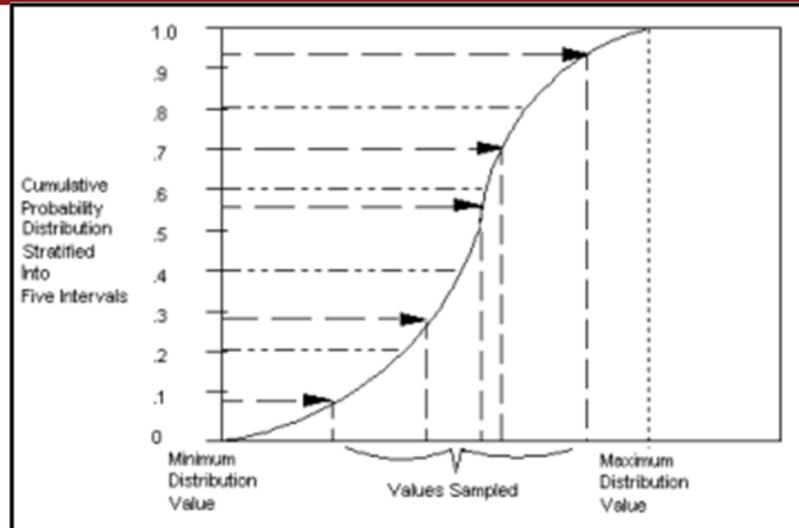
Gráfico 5.4-3 : Deficiencias en el muestreo Monte Carlo

Como se observa en la gráfica anterior, el muestreo no reflejará la forma de la distribución de probabilidad de ingreso para un número pequeño de iteraciones en el muestreo. Debido a este fenómeno, este método requiere un gran número de iteraciones en el muestreo para reflejar adecuadamente la distribución de la variable aleatoria de ingreso. (Palisade, 2010)

5.4.3.2 Muestreo Latino Hipercúbico

El método de muestreo Latino Hipercúbico, como punto de partida toma en cuenta también el muestreo basado en generación de números aleatorios para el rango “Y” de la distribución de probabilidad acumulada de la variable, y con estos obtiene las muestras aleatorias de la variable de ingreso.

Sin embargo, este método incorpora el concepto de estratificación del eje Y de la curva de probabilidad acumulada, en rangos de igual probabilidad, como se muestra en la gráfica 5.4-4.



Fuente: Palisade, 2010

Gráfico 5.4-4 : Estratificación en el muestreo Latino Hipercúbico

Como se muestra en la gráfica anterior, con las estratificaciones se “fuerza” a las muestras (aunque estas sean pequeñas) a representar adecuadamente a la distribución de probabilidad de ingreso.

En esta técnica de muestreo, el número de estratificaciones es igual al número de iteraciones en el muestreo. Con esto se logra hacer un “muestreo sin reemplazo” debido a que como el número de “estratos” es igual al número de iteraciones, una vez que se toma una muestra del estrato, no se vuelve a tomar una muestra de este. (Palisade, 2010)

Debido a sus características, puede considerarse que este método de muestreo es uno de los más eficaces, pues requiere un número considerablemente menor de iteraciones en el muestreo, en comparación con el muestreo Monte Carlo, para representar adecuadamente la distribución de probabilidad de entrada. Con esto se pueden reducir los tiempos de simulación probabilística.

5.4.3.3 Convergencia en el muestreo

Una metodología simple y efectiva para comprobar el funcionamiento de un método de muestreo utilizado, es la convergencia. Se dice que en el punto de convergencia las distribuciones de salida alcanzan su estabilidad, es decir, si se realizan más

iteraciones, no se producen cambios notables en los parámetros que definen la variable aleatoria de salida.

Como parámetros de convergencia, suelen tomarse la media, la desviación estándar, percentiles de probabilidad, kurtosis y otras medidas estadísticas, de acuerdo a lo requerido en el trabajo específico.



6 METODOLOGÍA

6.1 Caso de estudio

Como se mencionó en la introducción, el presente trabajo de tesis tiene por finalidad cuantificar la variabilidad de los factores de seguridad al volteo, deslizamiento y por capacidad portante en el diseño de muros de contención en voladizo causada por la variabilidad de los parámetros geotécnicos, pues de acuerdo a lo mencionado por Prada (Prada:2011), “ La geotecnia puede considerarse como una de las áreas de la Ingeniería Civil más complejas y en donde más simplificaciones se hacen para entender y poder reproducir el comportamiento del suelo...”.

Se pretende obtener ecuaciones simples que permitan cuantificar la variabilidad de la los factores de seguridad, en función de la variabilidad del peso específico, la cohesión en condiciones no drenadas y el ángulo de fricción interna. Se ha planteado obtener las ecuaciones mediante regresiones de datos obtenidos por simulaciones resultantes de múltiples diseños probabilísticos de muros de contención de diferentes alturas, con diferentes propiedades de suelo y diferentes coeficientes de variación de los parámetros geotécnicos.

Debido a lo amplio que resultaría el hecho de tomar todos los casos posibles, los muros de contención que abarca el presente estudio poseen las siguientes características:

- Suelo de cimentación cohesivo.
- Suelo retenido granular.
- Alturas de 4 m, 5 m, 6 m y 7m
- Valores del ángulo de fricción de suelo retenido de 30° - 38°.
- Valores de cohesión de $10 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$ - $30 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$.
- No existen inconvenientes con los asentamientos.
- Sobrecarga de diseño de $250 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$.
- Peso específico del suelo retenido igual a $1.9 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$.
- Nivel freático muy profundo.

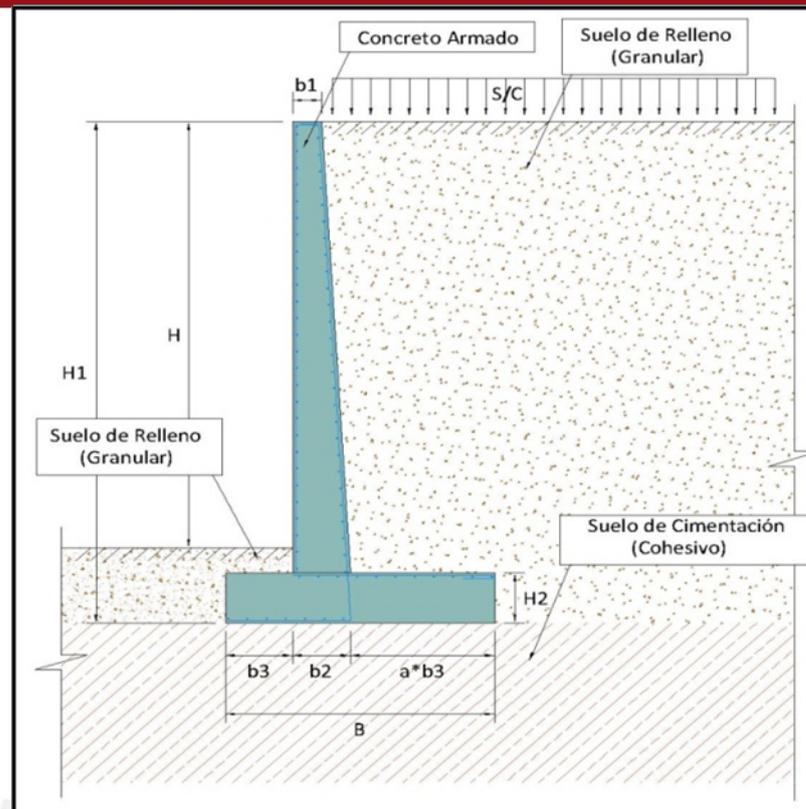
De acuerdo a lo indicado por Bowles (Bowles, 1982), existe una cierta correlación entre el valor del ángulo de fricción de suelo retenido y su correspondiente peso específico. Siguiendo esta recomendación, deberían considerarse en el análisis diferentes valores medios de peso específico. Sin embargo, se consideró solamente un valor medio del peso específico, pues el análisis de sensibilidad mostrado en el Anexo I, indica que la variación del valor medio de " γ " no tiene una influencia considerable en el cálculo de los Factores de Seguridad. Adicionalmente, considerar nuevos escenarios variando el valor de " γ " habría cuadruplicado o quintuplicado el esfuerzo numérico sin mejoras aparentes en el resultado final (de acuerdo a lo demostrado en el Anexo I).

Sin embargo, cabe resaltar que en el modelo probabilístico, sí se consideró el aporte de la variabilidad de este parámetro en la estimación de la variabilidad de los factores de seguridad.

6.2 Pre-dimensionamiento del muro de contención

Para el desarrollo del presente trabajo, se han dimensionado los muros de contención en voladizo de acuerdo a las recomendaciones dadas por Das (Das, 2006) y Bowles (Bowles, 1988).

A excepción de la base (que resultará de las verificaciones de estabilidad), se han determinado parámetros constantes y variables (de acuerdo a la altura del muro) en las dimensiones para tener un criterio estándar de comparación, aun cuando las propiedades del suelo y/o la altura del muro varíen. El gráfico 6.2-1 muestra los parámetros adoptados en el dimensionamiento.



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 6.2-1 : Pre – dimensionamiento del muro de contención

Donde:

- b_1 : Ancho superior de la pantalla del muro; se adoptó el valor de 0.30 m.
- b_2 : Ancho inferior de la pantalla del muro; se adoptó el valor de $\frac{H}{10}$.
- b_3 : Longitud de la punta del muro, la estimación de este valor se obtiene en los diseños de estabilidad al deslizamiento, estabilidad al volteo y por capacidad portante.
- $a \cdot b_3$: Longitud del talón del muro, se ha definido este valor como un múltiplo de la longitud de la punta.
- a : Constante que multiplica a b_3 para estimar la longitud del talón del muro, se ha estimado asignarle un valor de 2.
- H : Altura del muro, se ha trabajado con valores de 4m, 5m, 6m y 7m.

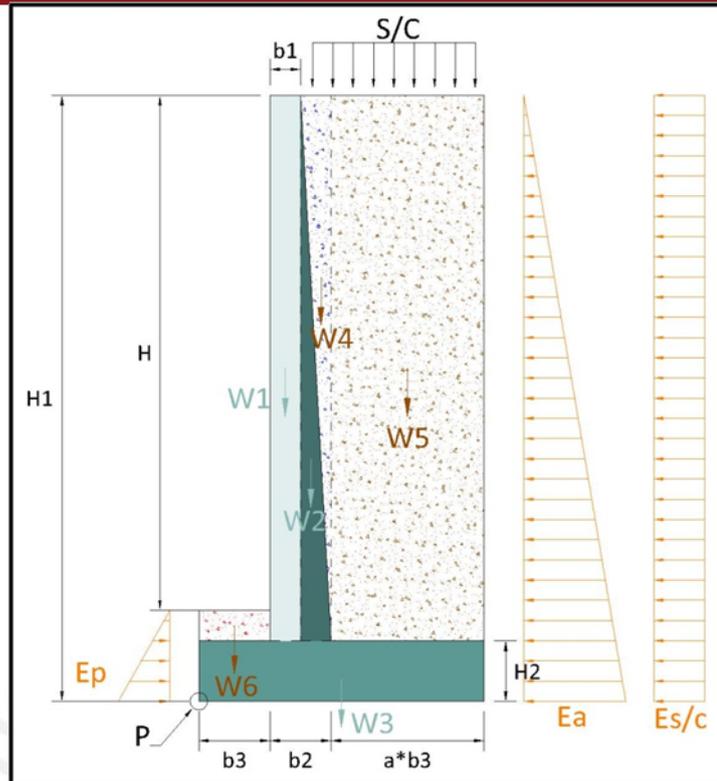
- H1 : Altura desde la parte superior del muro hasta el fondo de cimentación.
- H2 : Peralte de la losa del muro, se ha asumido un valor de 60 cm.
- B : Base del muro.
- S/C : Sobrecarga de diseño; se estimó esta igual a 250 kg/m².

6.3 Diseño Determinístico del muro de contención

Para determinar la variabilidad de los factores de seguridad en función de la variabilidad de los parámetros geotécnicos, primeramente se diseñaron los muros de contención que contempla el alcance del trabajo de tesis mediante un modelo determinístico, es decir, tomando en cuenta solamente el valor medio de los parámetros (lo cual es en general una práctica usual en el diseño de este tipo de obras) con la finalidad de determinar el valor de la base del muro que satisfaga los factores de seguridad para la estabilidad al deslizamiento (seguridad ante el desplazamiento lateral), estabilidad al volteo (seguridad ante el volcamiento) y la capacidad portante (seguridad ante la falla por capacidad de soporte del suelo de fundación).

6.3.1 Fuerzas actuantes consideradas en el diseño

El análisis de los muros de contención se realizó para condiciones estáticas y una longitud unitaria, tomando en cuenta la acción de fuerzas de gravedad, el empuje del suelo y la acción de la sobrecarga, como se muestra en el gráfico 6.3-1.



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 6.3-1 : Fuerzas actuantes consideradas en el diseño

6.3.1.1 Fuerzas de gravedad

En el análisis de los muros de contención se incluyeron las cargas de gravedad correspondientes al peso propio de los materiales que constituyen el muro de contención, considerando el peso del concreto armado (W_1 , W_2 y W_3), así como el peso del suelo retenido (W_4 , W_5 y W_6)

En el cuadro 6.3-1 se resume el valor de las fuerzas de gravedad consideradas y el brazo que genera momento en el punto P .

Cuadro 6.3-1 : Fuerzas de gravedad actuantes (que producen momentos resistentes)

FUERZA	VALOR DE LA RESULTANTE	BRAZO	SENTIDO DE MOMENTO
W1	$(H1 - H2) \cdot b1 \cdot \gamma_{CA}$	$\frac{b1}{2} + b3$	Horario
W2	$(b2 - b1) \cdot \left(\frac{H1 - H2}{2}\right) \cdot \gamma_{CA}$	$(b2 - b1) \cdot \frac{1}{3} + b3 + b1$	Horario
W3	$B \cdot H2 \cdot \gamma_{CA}$	$\frac{B}{2}$	Horario
W4	$(b2 - b1) \cdot \left(\frac{H1 - H2}{2}\right) \cdot \gamma_{SR}$	$(b2 - b1) \cdot \frac{2}{3} + b3 + b1$	Horario
W5	$\alpha \cdot b3 \cdot (H1 - H2) \cdot \gamma_{SR}$	$\frac{\alpha \cdot b3}{2} + b2 + b3$	Horario
W6	$(H1 - H - H2) \cdot b3 \cdot \gamma_{SR}$	$\frac{b3}{2}$	Horario

Donde:

- γ_{CA} : Peso específico del Concreto Armado, considerado igual a 2.4 $\frac{ton}{m^3}$ en todos los cálculos.
- γ_{SR} : Peso específico del suelo retenido.

6.3.1.2 Empuje de Suelos

De acuerdo a lo citado por Das (Das, 2006), el uso de la teoría de la presión activa de Rankine es teóricamente correcta si la zona de corte limitada por una línea que une el punto extremo inferior izquierdo del muro, con el extremo superior izquierdo de este (ver gráfico de fuerzas actuantes consideradas en el diseño) no es obstruida por el cuerpo del muro, siendo este el caso de los muros en estudio (muro en voladizo).

Asimismo Bowles (Bowles, 1988) indica que es común y conservador el uso de la teoría de Rankine mediante los coeficientes K_a y K_p .

Adicionalmente cabe mencionar que el hecho de considerar el efecto de la fricción suelo muro no se encuentra del lado de la seguridad, debido a que la incorporación

de éste efecto, incrementa la magnitud del empuje pasivo y se reduce la acción del empuje activo.

De acuerdo a las suposiciones previamente justificadas y a la geometría del talud, en el cuadro 6.3-2 se resume el valor de los empujes considerados y el brazo que genera momento en el punto P.

Cuadro 6.3-2 : Empuje de suelos

FUERZA	VALOR DE LA RESULTANTE	BRAZO	SENTIDO DE MOMENTO
Ea	$\frac{1}{2} \cdot K_A \cdot \gamma_{SR} \cdot (H_1)^2$	$\frac{H_1}{3}$	Antihorario
Ep	$\frac{1}{2} \cdot K_P \cdot \gamma_{SR} \cdot (H_1 - H)^2$	$\frac{H_1 - H}{3}$	Horario

Dónde:

K_A : Coeficiente de presión activa de tierras de Rankine.

$$K_A = \left(\tan \left(\frac{45 - \phi_{SR}}{2} \right) \right)^2$$

K_P : Coeficiente de presión pasiva de tierras de Rankine.

$$K_P = \left(\tan \left(\frac{45 + \phi_{SR}}{2} \right) \right)^2$$

ϕ_{SR} : Ángulo de fricción interna del suelo retenido.

6.3.1.3 Sobrecarga

La sobrecarga por definición es una carga adicional que debe considerar las acciones de las fuerzas a las que será sometido el muro de contención; como se mencionó anteriormente, en el presente trabajo se ha estimado para todos los

cálculos trabajar con una sobrecarga de $250 \frac{kg}{m^2}$.

Debe tenerse en cuenta que la acción de la sobrecarga genera un empuje adicional de suelos (E_s/c), el cual se estimó conservadoramente utilizando la teoría de

empuje de Rankine. En el cuadro 6.3-3 se resume el valor de las fuerzas actuantes generadas por la sobrecarga, y el brazo que genera momento en el punto P

Cuadro 6.3-3 : Empuje de suelos

FUERZA	VALOR DE LA RESULTANTE	BRAZO	SENTIDO DE MOMENTO
S/C	$\frac{s}{c} \cdot (b2 + a \cdot b3 - b1)$	$\frac{(b2 + a \cdot b3 - b1)}{2} + b1 + b3$	Horario
Es/c	$K_A \cdot \frac{s}{c} \cdot H1$	$\frac{H1}{2}$	Antihorario

6.3.2 Estabilidad de muros de contención en voladizo

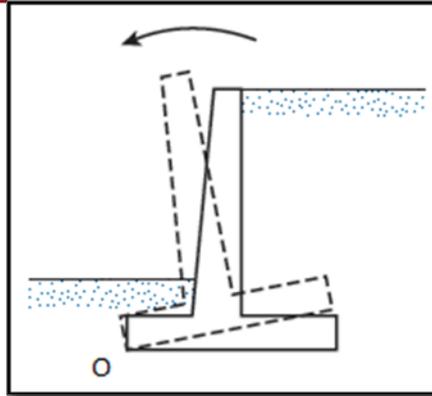
En el diseño geotécnico de un muro de contención, luego del pre-dimensionamiento de los elementos y la determinación de las fuerzas actuantes, debe verificarse la estabilidad de este, de modo que no se voltee, no se deslice, no exceda la capacidad portante del suelo y que no se genere una falla global.

De acuerdo a lo indicado en el párrafo anterior, se deben realizar las siguientes verificaciones de estabilidad:

- Estabilidad al volteo
- Estabilidad al deslizamiento
- Verificación por capacidad portante
- Estabilidad ante una falla global

6.3.2.1 Estabilidad al volteo

Debe verificarse la estabilidad del muro de contención ante las fuerzas que pueden causar que este rote. El gráfico 6.3-2 ilustra el giro del muro de contención alrededor del punto O.



Fuente: Das, 2006

Gráfico 6.3-2 : Estabilidad al volteo

El “Factor de Seguridad al Volteo” (FS_{volteo}) se define como:

$$FS_{\text{volteo}} = \frac{\sum M_{\text{resistentes}}}{\sum M_{\text{actuantes}}} \geq 1.5$$

Para el análisis de estabilidad al volteo, los momentos se toman alrededor del punto O, por ser el punto más crítico. En el presente trabajo, de acuerdo a las fuerzas descritas en el acápite anterior, se define:

$$\sum M_{\text{resistentes}} = M_{W1} + M_{W2} + M_{W3} + M_{W4} + M_{W5} + M_{W6} + M_{E_p}$$

$$\sum M_{\text{actuantes}} = M_{E_s} + M_{E_R}$$

Donde:

- M_{W1} : Momento alrededor del punto O causado por la fuerza definida W1.
- M_{W2} : Momento alrededor del punto O causado por la fuerza definida W2.
- M_{W3} : Momento alrededor del punto O causado por la fuerza definida W3.
- M_{W4} : Momento alrededor del punto O causado por la fuerza definida W4.

- M_{W5} : Momento alrededor del punto O causado por la fuerza definida W5.
- M_{W6} : Momento alrededor del punto O causado por la fuerza definida W6.
- M_{Ep} : Momento alrededor del punto O causado por la fuerza definida Ep.
- M_{Ea} : Momento alrededor del punto O causado por la fuerza definida Ea.
- $M_{E_{s/c}}$: Momento alrededor del punto O causado por la fuerza definida $E_{s/c}$.

Los momentos se calcularon como el producto del valor de la fuerza y el valor de brazo de momento, de acuerdo a las expresiones definidas en el acápite de fuerzas actuantes consideradas en el diseño.

Cabe resaltar que no se consideró el momento causado por la sobrecarga, debido a que este momento estabiliza el muro de contención, y al ser una carga viva, no se puede asegurar que va a estar siempre presente, por lo que se encuentra del lado de la seguridad no considerar dicho momento en el diseño.

Debido a que el trabajo busca realizar un análisis probabilístico, se diseñaron los muros de contención en estudio, de modo tal que estos tengan un factor de seguridad al volteo de al menos 1.5. Cabe resaltar que en algunos casos este factor de seguridad puede ser mayor debido a que el diseño puede estar dominado por otra condición de falla.

6.3.2.2 Estabilidad al desplazamiento

En el análisis de muros de contención, existen fuerzas que tienden a desplazar el muro de contención (como el empuje activo o el empuje causado por la sobrecarga). A contraparte, existen fuerzas que mantienen el muro de contención en su posición original.

Una de las componentes que contrarresta la acción de las fuerzas que tienden a desplazar el muro, es aquella que se genera en la interface suelo-concreto. Das define la “fuerza resistente máxima que se puede derivar del suelo por longitud unitaria del muro a lo largo del fondo de la losa de base...” (Das, 2006) como:

$$R' = B \cdot \sigma' \cdot \tan(\delta') + B \cdot c_a$$

Donde:

- R' : Fuerza resistente máxima que se puede derivar del suelo por longitud unitaria del muro a lo largo del fondo de la losa de base.
- B : Dimensión de la base del muro de contención.
- σ' : Esfuerzo vertical efectivo en la base del muro.
- δ' : Ángulo de fricción entre el suelo y la losa de base.
- c_a : Adhesión entre el suelo y concreto.

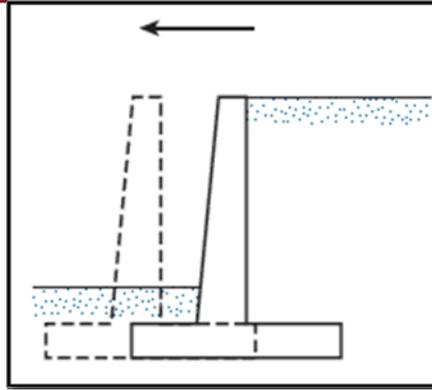
La expresión mostrada anteriormente es válida para suelos en general, sin embargo, los muros de contención de diseño del presente trabajo cuentan con un suelo de cimentación cohesivo. Para suelos cohesivos, la fuerza resistente máxima que se puede derivar del suelo por longitud unitaria del muro a lo largo del fondo de la losa de base se da como:

$$R' = B \cdot c_a$$

En suelos cohesivos, la adhesión (c_a) representa la resistencia unitaria al deslizamiento en la interface suelo- concreto, el cual puede cuantificarse como una fracción de la cohesión. De acuerdo a lo indicado por Das (Das, 2006) y Bowles (Bowles, 1988) el valor de c_a toma valores de $0.6 s_u - 0.8 s_u$.

Para el diseño determinístico de los muros de contención en análisis se vio por conveniente estimar en $0.7 s_u$ como el valor de la adhesión.

Debe verificarse la estabilidad del muro de contención ante las fuerzas que pueden causar que este se deslice. El gráfico 6.3-3 ilustra el deslizamiento del muro de contención.



Fuente: Das, 2006

Gráfico 6.3-3 : Estabilidad al deslizamiento

El “Factor de Seguridad al Deslizamiento” ($FS_{\text{deslizamiento}}$) se define como:

$$FS_{\text{deslizamiento}} = \frac{\sum F_{\text{resistentes}}}{\sum F_{\text{deslizantes}}} \geq 1.5$$

Para el análisis de estabilidad al deslizamiento, se evaluaron las fuerzas que tienden a deslizar el muro de contención y aquellas que resisten el deslizamiento. En el presente trabajo, de acuerdo a las fuerzas descritas previamente, se define:

$$\sum F_{\text{deslizantes}} = E_a + E_b$$

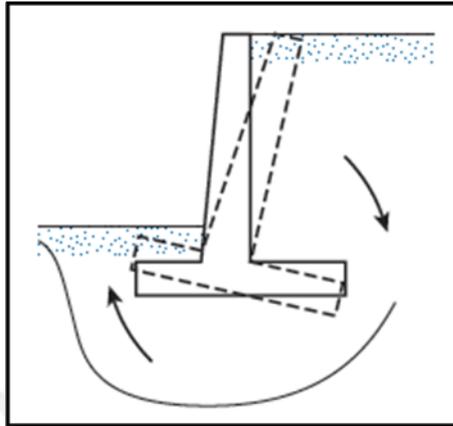
$$\sum F_{\text{resistentes}} = R' + E_p$$

Debido a que se busca realizar un análisis probabilístico, se diseñaron los muros de contención en estudio, de modo tal que estos tengan un factor de seguridad al deslizamiento de al menos 1.5. Cabe resaltar que en algunos casos este factor de seguridad puede ser mayor debido a que el diseño puede estar dominado por otra condición de falla.

6.3.2.3 Verificación por capacidad portante

La dimensión de la base del muro de contención debe diseñarse para cumplir las condiciones de cimentación, es decir, los esfuerzos transmitidos al terreno deben ser menores a la presión admisible por corte, que resulta de dividir la capacidad portante por un adecuado factor de seguridad.

Debe verificarse la estabilidad del muro de contención ante las fuerzas que pueden causar que este se hunda. El gráfico 6.3-4 ilustra una falla por capacidad portante del suelo de fundación.



Fuente: Das, 2006

Gráfico 6.3-4 : Verificación por capacidad portante

En el caso de suelos cohesivos, la capacidad portante del suelo de cimentación, depende de la cohesión en condiciones no drenadas del suelo de cimentación, el tipo de cargas transmitidas y la geometría de la base.

Una expresión que permite estimar la capacidad portante del suelo de cimentación es la “Ecuación de Capacidad de Carga de Meyerhoff”, la cual se define como:

$$q_d = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c + \bar{q} \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q + 0.5 \cdot \gamma_s \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma$$

Donde:

- c : Cohesión del suelo ubicado bajo la zapata (la que puede tomarse como s_u o resistencia al corte no drenado).
- \bar{q} : Sobrecarga debida a la presión ejercida por el peso del suelo.
- γ_s : Peso unitario volumétrico del suelo bajo el nivel de cimentación.
- s : Coeficiente de corrección por la forma de la cimentación.
- d : Coeficiente de corrección por la profundidad de la cimentación.
- i : Coeficiente de corrección por la inclinación de la carga.

- N_c : Coeficiente de capacidad de carga correspondiente a la cohesión.
- N_q : Coeficiente de capacidad de carga correspondiente a la sobrecarga.
- N_γ : Coeficiente de capacidad de carga correspondiente a la fricción.

Debido a que el suelo de cimentación de los muros de contención en estudio es cohesivo, el tercer sumando de la ecuación de Meyerhoff adopta el valor de cero.

Asimismo, no existe suficiente evidencia de que los resultados que se obtienen de la aplicación de los coeficientes de corrección de Meyerhoff estén siempre del lado de la seguridad, por lo que es conveniente no aplicar algunas de sus correcciones. Asimismo, para las condiciones de los muro de contención en estudio, se tiene:

$$N_c = \pi + 2$$

$$i_c = \left(1 - \alpha \frac{q}{90}\right)^2$$

$$\bar{q} = \gamma_{\text{suelo cimentación}} \cdot (H1 - H)$$

$$N_q = 1$$

$$i_q = \left(1 - \alpha \frac{q}{90}\right)^2$$

Debe tenerse en cuenta que en las expresiones anteriores, debido a la longitud del muro, se consideró el valor $s_c = 1$ debido a que se asume la forma como una zapata continua. Asimismo el ángulo α , es aquel que forma la fuerza resultante con la vertical.

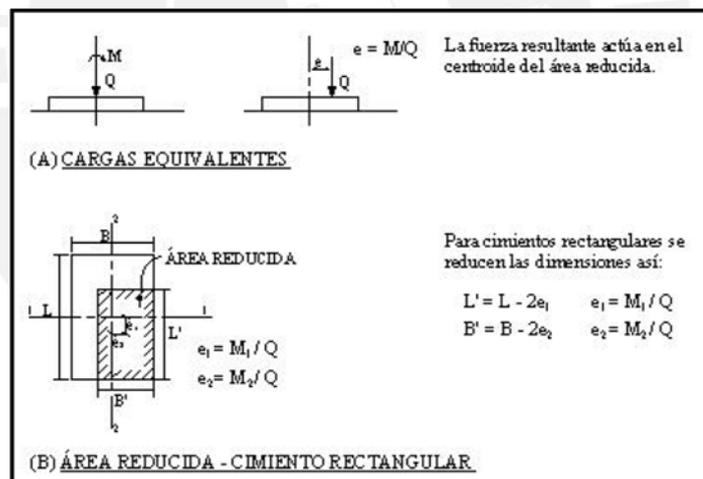
Con las consideraciones anteriores, la expresión aplicable al diseño por capacidad portante para los muros en estudio se reduce a:

$$q_{ad} = 5.14 \cdot s_w \cdot \left(1 - \alpha \frac{q}{90}\right)^2 + \gamma_{\text{suelo cimentación}} \cdot (H1 - H) \cdot \left(1 - \alpha \frac{q}{90}\right)^2$$

La resultante del conjunto de fuerzas actuantes, ubicada al centro de la base del muro de contención se compone de una componente vertical, una componente horizontal y un momento flector. Es habitual en el diseño de cimentaciones que dadas ciertas condiciones, como en el caso de muros de contención, se consideren las correcciones por inclinación de carga y por excentricidad como efectos no superpuestos, es decir, se toman en cuenta los efectos de la carga horizontal y del momento flector por separado, se calculan las dimensiones independientemente, y se opta por la dimensión más grande.

6.3.2.3.1 Verificación por capacidad portante – excentricidad

Debido a que se tiene el caso de efectos no superpuestos, en el caso de la verificación por capacidad portante – excentricidad, se toma en cuenta solamente el efecto de una excentricidad equivalente, determinada por el momento flector. De acuerdo al criterio de Meyerhof y lo indicado por la norma E.050, se reduce el área efectiva sobre la que el muro transmitirá las cargas sobre el suelo de fundación, como se muestra en el gráfico 6.3-5.



Fuente: Norma Técnica Peruana E.050

Gráfico 6.3-5 : Área Efectiva debido a la excentricidad

Debido a que en los muros de contención en estudio se considera que los esfuerzos longitudinales son despreciables y adicionalmente que trabaja con anchos unitarios, los esfuerzos transmitidos al terreno pueden estimarse mediante:

$$q\alpha_z = \frac{\sum F_z}{B'}$$

Para la estimación de los términos que intervienen en la expresión anterior, de acuerdo a la nomenclatura presentada previamente, se tiene:

$$\sum F_v = W1 + W2 + W3 + W4 + W5 + W6 + \frac{S}{C} \cdot (b2 - b1 + \alpha \cdot b3)$$

$$E' = S - 2e$$

Debido a las características de la verificación por excentricidad, no se toman en cuenta los efectos de la inclinación de la carga, estimándose la capacidad portante mediante:

$$qa_e = 5.14 \cdot f_u + \gamma_{suelo \text{ cimentación}} \cdot (H1 - H)$$

El "Factor de Seguridad por Capacidad Portante - Excentricidad" (FS_{cp-e}) se define como:

$$FS_{cp-e} = \frac{qa_e}{q\alpha_e} \geq 3.0$$

Debido a que se busca realizar un análisis probabilístico, se diseñaron los muros de contención en estudio, de modo tal que estos tengan un factor de seguridad a la falla por capacidad portante de 3.0. Cabe resaltar que en algunos casos este factor de seguridad puede ser mayor debido a que el diseño puede estar dominado por otra condición de falla.

6.3.2.3.2 Verificación por capacidad portante – inclinación

En la verificación por capacidad portante debido al efecto de la inclinación no se reduce el área de la base debido a que al ser efectos no superpuestos, no se considera el efecto de la excentricidad. El esfuerzo transmitido al suelo de cimentación puede estimarse mediante:

$$q\alpha_i = \frac{\sum F_v}{B}$$

Para la estimación de los términos que intervienen en la expresión anterior, de acuerdo a la nomenclatura previamente presentada, se tiene:

$$\sum F_v = W1 + W2 + W3 + W4 + W5 + W6 + \frac{S}{C} \cdot (b2 - b1 + \alpha \cdot b3)$$

Para tomar en cuenta el efecto de la inclinación de la carga se estima el ángulo que forma la fuerza resultante con la vertical (α) mediante la siguiente expresión.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\sum F_h}{\sum F_v}\right)$$

El término $\sum F_h$ hace referencia a la resultante de las fuerzas actuantes en dirección horizontal, el cual puede ser estimado mediante la fuerza horizontal resultante de empuje de tierras.

La capacidad portante para esta verificación puede estimarse mediante:

$$q\alpha_t = 5.14 \cdot s_u \cdot \left(1 - \alpha \frac{D}{90}\right)^2 + Y_{\text{estado cimentación}} \cdot (H1 - H) \cdot \left(1 - \alpha \frac{D}{90}\right)^2$$

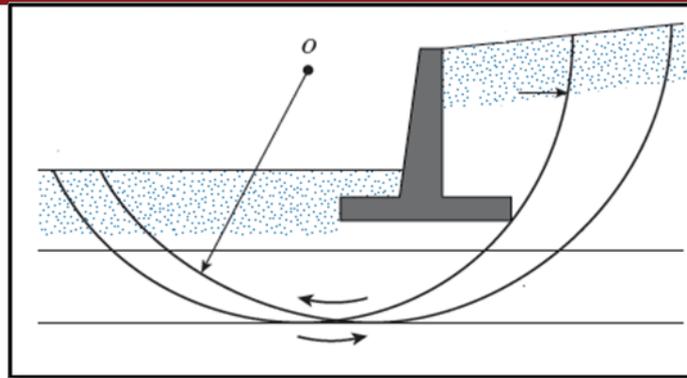
El “Factor de Seguridad por Capacidad Portante - Inclinación” (FS_{cp-i}) se define como:

$$FS_{cp-i} = \frac{q\alpha_t}{q\alpha_t} \geq 3.0$$

Debido a que se busca realizar un análisis probabilístico, se diseñaron los muros de contención en estudio, de modo tal que estos tengan un factor de seguridad a la falla por capacidad portante de 3.0. Cabe resaltar que en algunos casos este factor de seguridad puede ser mayor debido a que el diseño puede estar dominado por otra condición de falla.

6.3.2.4 Estabilidad ante una falla global

En el diseño de muros de contención, resulta de vital importancia verificar la estabilidad global mediante un análisis de estabilidad de taludes, debido a que la superficie de falla puede pasar bajo el muro, como lo muestra el gráfico 6.3-6.



Fuente: Das, 2006

Gráfico 6.3-6 : Estabilidad ante una falla global

Debido al considerable tiempo que demandaría implementar una rutina de cálculo para un modelo probabilístico de un análisis de estabilidad de taludes, el presente trabajo no considera dentro de las estimaciones realizadas el análisis de la variabilidad del FS por estabilidad global.

6.4 Modelo Probabilístico

6.4.1 Descripción

Debido a que los parámetros y el comportamiento de los suelos poseen una variabilidad inherente, los diseños en términos determinísticos no resultan óptimos en términos económicos, pues no permiten cuantificar la confiabilidad del diseño ni tomar decisiones en cuanto al comportamiento esperado de la estructura en función de probabilidades.

Una técnica que permite cuantificar mediante probabilidades el desempeño de las estructuras es el Método Monte Carlo, el cual (de acuerdo a lo descrito en el Marco Teórico) utiliza como dato de ingreso distribuciones de probabilidad de los valores que intervienen en el diseño, utilizando un muestreo aleatorio para simular mediante un gran número de valores generados el comportamiento del sistema. Es decir, se generan muchos diseños determinísticos utilizando valores de las distribuciones de probabilidad de ingreso, seguidamente la data resultante de los múltiples diseños determinísticos se ajusta a una curva de probabilidad. Con esta curva de salida, puede estimarse el comportamiento probabilístico del factor de seguridad en análisis.

6.4.2 Variabilidad de los datos de ingreso

Debido a que el presente trabajo pretende analizar la influencia de la variabilidad de los parámetros geotécnicos en la variabilidad de los factores de seguridad de diseño, se ha considerado solamente introducir en el modelo probabilístico como valores de ingreso las curvas de probabilidad para: el peso específico del suelo retenido, el valor del ángulo de fricción del suelo retenido y el valor de la cohesión en condiciones no drenadas para el suelo de cimentación, de acuerdo a los alcances del trabajo de tesis.

6.4.2.1 Variabilidad de γ , s_u y ϕ

Debido a que este trabajo pretende tomar en cuenta diversos escenarios, la cuantificación de los factores que describen la variabilidad de los parámetros geotécnicos no se obtuvieron en mediciones o ensayos realizados. Los parámetros de variabilidad empleados para los análisis corresponden a valores reportados en investigaciones anteriores.

Hidalgo Montoya (Hidalgo Montoya, 2011a) en su publicación “Herramientas para Análisis por Confiabilidad en Geotecnia: La Teoría” recopila de investigaciones publicadas en revistas indexadas, rangos de valores de coeficientes de variación probables de los parámetros geotécnicos en estudio. Esta publicación indica que cuando no se dispone de un número suficiente de ensayos, se puede, con carácter preliminar, utilizar coeficientes de variación estimados (desviación estándar sobre la media), a partir de valores típicos que han mostrado tener poca sensibilidad temporal y espacial. Cabe resaltar que se realizó una verificación en las fuentes originales de los valores presentados en la publicación mencionada anteriormente.

Asimismo, si se tuvieran datos confiables de mediciones en campo y/o laboratorio, se debería realizar un ajuste estadístico a estos valores y determinar mediante una prueba de bondad de ajuste (como la prueba Smirnov – Kolmogorov por ejemplo) la distribución estadística y los parámetros requeridos para describir la variabilidad de los parámetros de ingreso.

En el cuadro 6.4-1 se resumen los rangos de valores de coeficientes de variación probables de los parámetros geotécnicos en estudio.

Cuadro 6.4-1 : Rangos de valores de coeficientes de variación de los parámetros geotécnicos en estudio

PARÁMETRO	COEFICIENTE DE VARIACIÓN	FUENTE ORIGEN
Peso Específico (γ)	4 % - 8 %	(Ribeiro : 2000)
Cohesión en condiciones no drenadas (S_u)	11 % - 45 %	(Duncan : 2000)
Ángulo de Fricción (ϕ)	3.7 % - 9.3 %	(USACE : 1990)

Fuente: (Hidalgo Montoya : 2011)

Para considerar el rango de los coeficientes de variación, estos se dividieron en 5 valores y se realizaron las simulaciones para cada uno de estos valores en cada caso de simulación. A continuación se listan los valores considerados:

- Coeficiente de Variación del Peso específico (cv_γ) : 4 %, 5 %, 6 %, 7 %, 8 %.
- Coeficiente de Variación de la Cohesión (cv_{su}) : 11 %, 19.5 %, 28 %, 36.5 %, 45 %.
- Coeficiente de Variación del Ángulo de Fricción (cv_ϕ) : 3.5 %, 5 %, 6.5 %, 8 %, 9.5 %.

De acuerdo a lo indicado por Baecher (Baecher, 2003), existe suficiente evidencia que los parámetros en estudio se distribuyen mediante la distribución normal, sin embargo, algunas investigaciones indican que el valor de la cohesión podría ajustarse mediante la curva Log-Normal.

En el presente trabajo se empleó la distribución normal para caracterizar la función de densidad de probabilidad para el peso específico, la cohesión en condiciones no drenadas y el ángulo de fricción interna.

Cabe resaltar que la distribución normal por su característica considera valores entre $-\infty$ y $+\infty$, por lo que las distribuciones de ingreso al modelo se truncaron en $\pm 3\sigma$ (donde σ es la desviación estándar), de modo que estadísticamente, se tome el 99.7 % del área bajo la curva sin truncar. Asimismo se limitó a cero el valor del

límite inferior siempre y cuando la media menos tres veces la desviación estándar resulte un número negativo.

6.4.2.2 Variabilidad de la adhesión c_a

De acuerdo a lo descrito en el acápite correspondiente a la estabilidad de muros de contención, en suelos cohesivos la adhesión posee valores entre 0.5 y 0.7 (Bowles, 1982) veces el valor de la cohesión considerada en el diseño. Por ello, para considerar el aporte de la incertidumbre en la estimación de este parámetro en la variabilidad de los factores de seguridad, se consideró emplear una función del tipo constante, truncada entre los valores $0.5 s_u$ y $0.7 s_u$.

6.4.3 Simulaciones realizadas

Se realizaron múltiples diseños determinísticos de acuerdo a las características de los muros de contención en estudio, para lo cual se tomaron en cuenta los siguientes casos:

- Alturas de 4 m, 5 m, 6 m y 7m.
- Valores del ángulo de fricción de suelo retenido de 30° , 32° , 34° , 36° y 38° .
- Valores de cohesión de $10 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$, $15 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$, $20 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$, $25 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$ y $30 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$.

Con ello, se totalizaron 100 diseños determinísticos, los cuales se realizaron tomando en cuenta condiciones estáticas, de acuerdo a los parámetros de estabilidad previamente mencionados.

El modelo probabilístico se implementó mediante el software @Risk, que permite modelar una hoja de cálculo probabilística utilizando el Método Monte Carlo. Para cada simulación se utilizaron 5000 iteraciones determinísticas.

6.4.3.1 Simulaciones Individuales

Con el propósito de reducir variables y obtener mejores aproximaciones en las expresiones buscadas, se realizaron simulaciones probabilísticas, para obtener el coeficiente de variación de los factores de seguridad, en la que solamente se introduce la distribución probabilística de una variable (γ , S_u ó Φ), mientras que las otras dos variables permanecen constantes A estas simulaciones se les denominó "Simulaciones Individuales".

En el gráfico 6.4-1 se muestra un esquema ilustrativo de las “Simulaciones Individuales”.

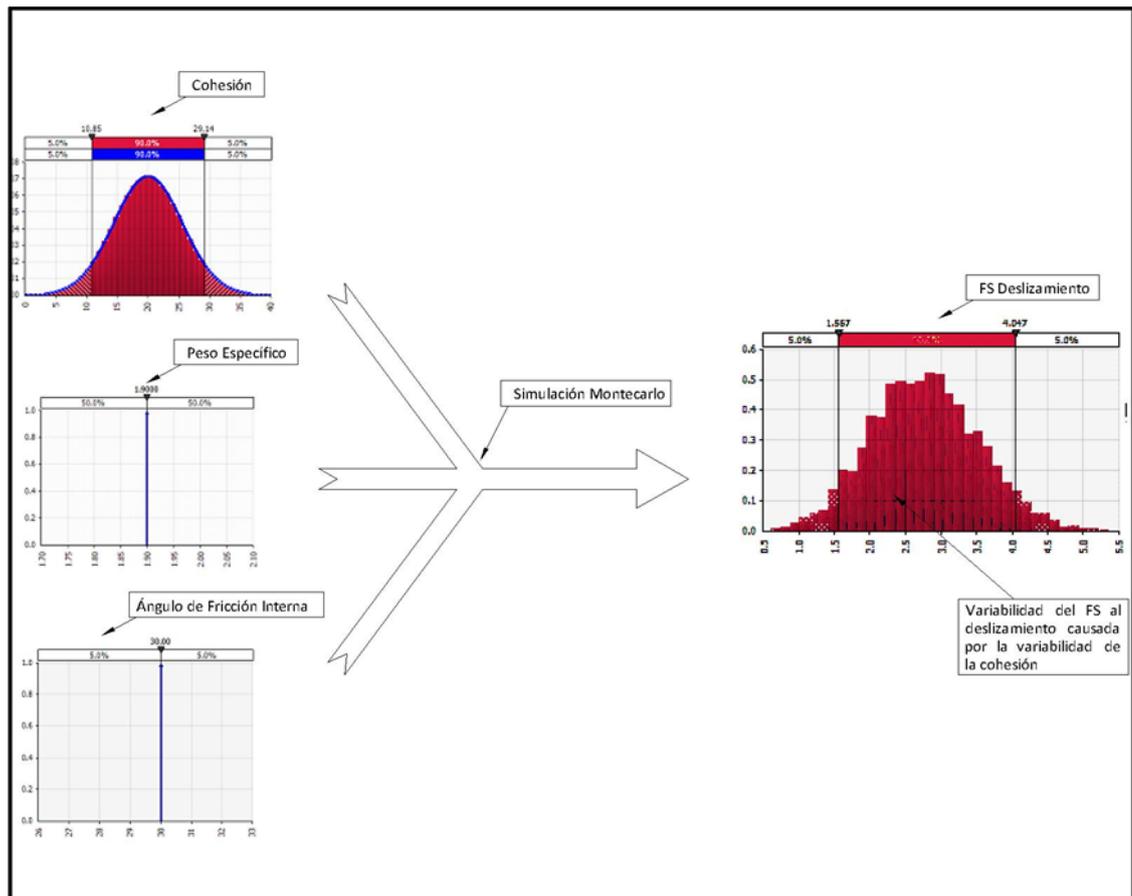


Gráfico 6.4-1 : Esquema ilustrativo – Simulaciones Individuales

Se realizaron simulaciones individuales a los 100 diseños determinísticos con cada valor de coeficiente de variación considerado en el acápite “Variabilidad del peso específico, s_u y ϕ ”, resultando un total de 1500 simulaciones probabilísticas individuales para cada tipo de FS evaluado (al volteo, al desplazamiento, por capacidad portante-excentricidad y por capacidad portante-inclinación).

Asimismo en todos los modelos correspondientes a las simulaciones individuales se incluyó la variabilidad de la adhesión C_a , expresada como una función constante, truncada entre los valores $0.5 s_u$ y $0.7 s_u$.

En el Anexo II se muestra el resumen de todas las simulaciones individuales.

6.4.3.2 Simulaciones de Grupo

Para estimar la variabilidad del factor de seguridad, se realizaron simulaciones en las que intervienen las distribuciones probabilísticas de las tres variables en estudio. A estas simulaciones se les denominó “Simulaciones de Grupo”.

En el gráfico 6.4-2 se muestra un esquema ilustrativo de las “Simulaciones de Grupo”.

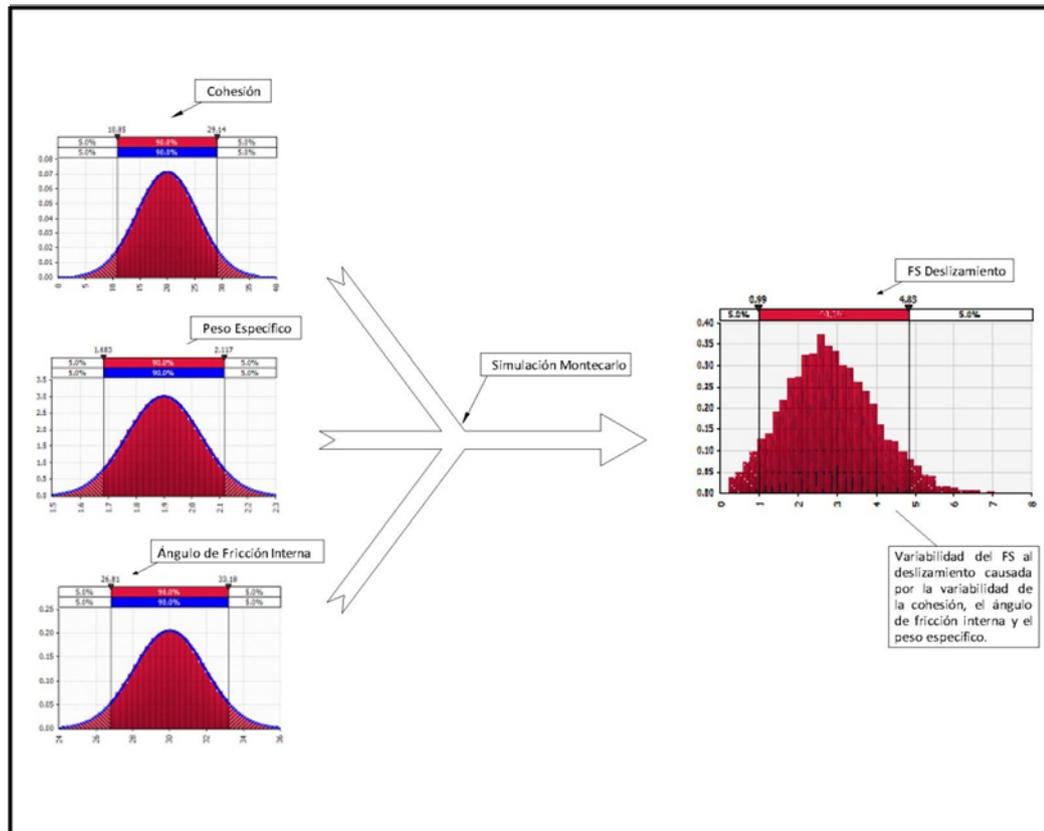


Gráfico 6.4-2 : Esquema ilustrativo – Simulaciones de Grupo

Se realizaron simulaciones individuales a los 100 diseños determinísticos, determinando combinaciones de coeficientes de variación de los parámetros aleatoriamente, de modo que la regresión que se obtenga pueda ser válida para cualquier combinación de coeficientes de variación. Se escogieron 15 casos de combinaciones de coeficientes de variación, resultando a su vez un total de 1500 simulaciones probabilísticas de grupo para cada tipo de FS evaluado (al volteo, al desplazamiento, por capacidad portante-excentricidad y por capacidad portante-inclinación).

En el cuadro 6.4-2 se muestra las combinaciones tomadas en cuenta.

En el Anexo III se muestra el resumen de todas las simulaciones individuales.

Cuadro 6.4-2 : Combinaciones de Coeficientes de Variación para las Simulaciones de Grupo

Combinación	CV_y	CV_{s_u}	CV_ϕ
1	4.00%	3.50%	11.00%
2	5.00%	5.00%	19.50%
3	6.00%	6.50%	28.00%
4	7.00%	8.00%	36.50%
5	8.00%	9.50%	45.00%
6	6.00%	8.00%	28.00%
7	6.00%	9.50%	19.50%
8	7.00%	6.50%	36.50%
9	5.00%	6.50%	45.00%
10	6.00%	5.00%	36.50%
11	6.00%	3.50%	19.50%
12	8.00%	9.50%	19.50%
13	7.00%	6.50%	11.00%
14	4.00%	5.00%	28.00%
15	4.00%	3.50%	28.00%

Asimismo en todos los modelos correspondientes a las simulaciones de grupo se incluyó la variabilidad de la adhesión C_a , expresada como una función constante, truncada entre los valores $0.5 s_u$ y $0.7 s_u$.

7 RESULTADOS

De acuerdo a los procedimientos indicados en la metodología, y teniendo en cuenta los criterios explicados en el marco teórico, se realizaron cálculos correspondientes a:

- Diseño determinístico.
- Modelo Probabilístico
 - Simulaciones Individuales y Regresiones
 - Simulaciones de grupo y Regresiones

Para obtener las expresiones que permiten estimar la variabilidad de los factores de seguridad, en función de la variabilidad de parámetros geotécnicos y las características del muro de contención, se emplearon regresiones numéricas, tomando como premisa obtener expresiones sencillas y reducir al máximo el número de variables, sin que esto implique sacrificar la calidad de los resultados.

Las regresiones realizadas se basaron en la teoría de los mínimos cuadrados, mediante la cual se ajusta los datos a una función de modo que la suma de los cuadrados de las diferencias en las ordenadas entre los puntos generados por la función elegida y los datos, sea mínima.

La “calidad” de la expresión obtenida mediante las regresiones se cuantifica mediante el coeficiente de determinación “ r^2 ”. El coeficiente de determinación varía entre 0 y 1, y representa la capacidad predictiva del modelo, pues constituye la proporción de la varianza de la variable dependiente explicada por la función obtenida mediante la regresión.

Cuando la regresión implica más de una variable independiente, el valor del coeficiente de determinación se obtiene mediante el cuadrado de una ponderación de los coeficientes de correlación (r) de cada variable independiente. De acuerdo a lo mencionado previamente, el valor de r^2 irá creciendo a medida que se introduzcan más variables; la introducción de más variables en la correlación no garantiza un mejor ajuste, por lo que se emplea como criterio de medida de la “calidad” de la regresión el valor de r^2 , el cual se estima mediante:

$$r_{\text{corregido}}^2 = 1 - (1 - r^2) \left(\frac{N - 1}{N - K - 1} \right)$$

Dónde:

- $r_{\text{corregido}}^2$: Coeficiente de determinación corregido.
- r^2 : Coeficiente de determinación.
- N : Número de datos.
- K : Número de variables

7.1 Resultados de los diseños determinísticos

Tomando en cuenta las características de los muros descritos en el acápite “Caso de Estudio”, se diseñaron determinísticamente 100 muros de contención.

En el diseño determinístico, tomando en cuenta los parámetros fijados en los criterios de pre-dimensionamiento, para cada criterio de estabilidad (al volteo, al desplazamiento, capacidad pórtate-inclinación y capacidad portante-excentricidad), se calcularon los valores de la base (B) del muro de contención, de modo que el factor de seguridad determinístico sea el correspondiente al mínimo pre-fijado en la metodología.

Mediante el procedimiento explicado previamente, por cada muro de contención se cuentan con 4 valores de la base (un valor por cada criterio de estabilidad). Como valor de diseño se eligió el mayor valor de estos, y posteriormente se re-calcularon los factores de seguridad para cada criterio de estabilidad.

Debido a la gran extensión de valores numéricos, los resultados de los diseños determinísticos se muestran en gráficos que relacionan el valor de “Su”, “ ϕ ”, y “B”, para cada altura del muro de contención en análisis.

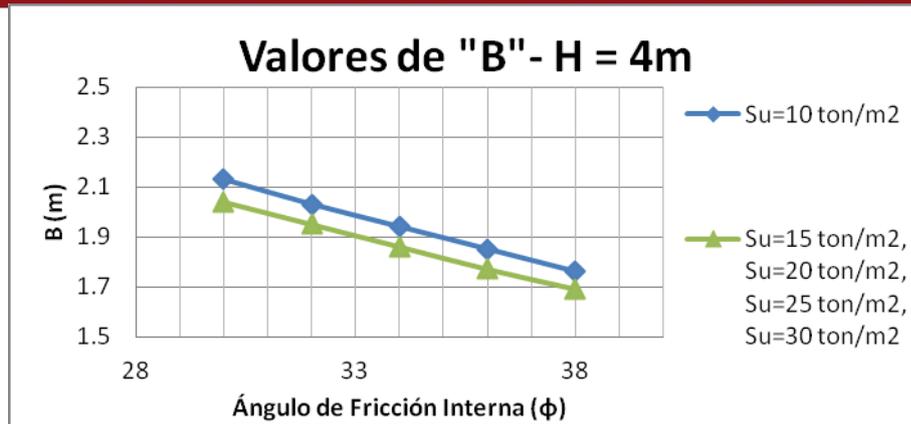


Gráfico 7.1-1 : Resumen del Diseño Determinístico H=4

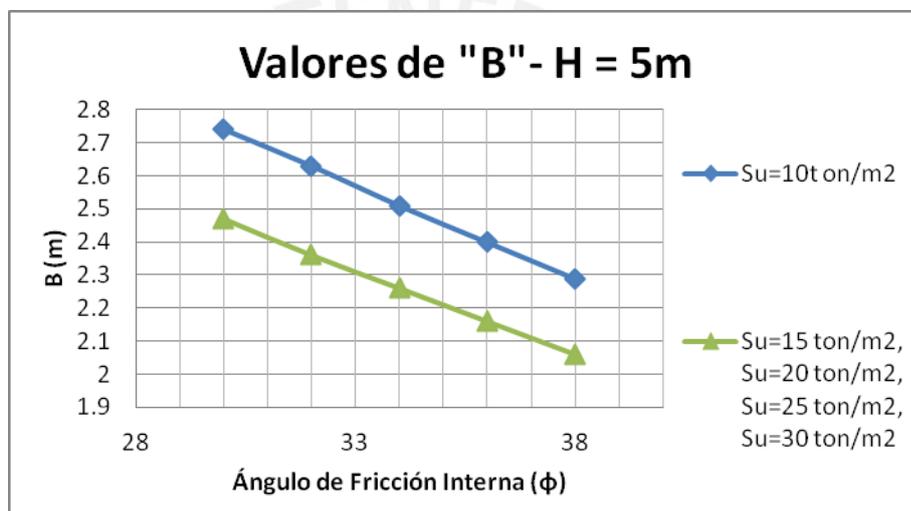


Gráfico 7.1-2 : Resumen del Diseño Determinístico H=5

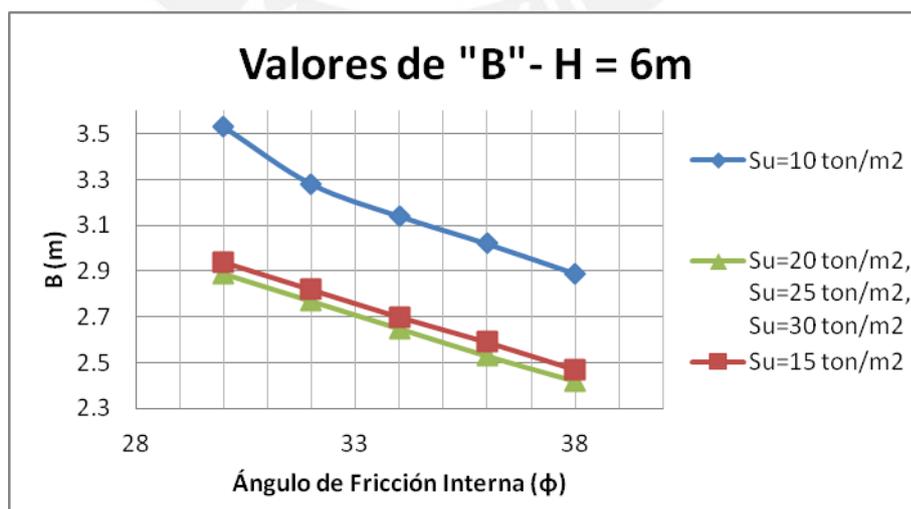


Gráfico 7.1-3 : Resumen del Diseño Determinístico H=6

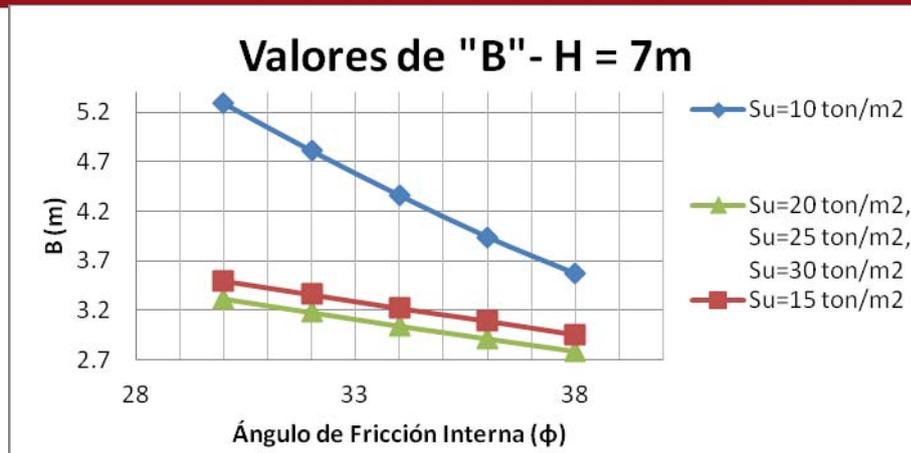


Gráfico 7.1-4 : Resumen del Diseño Determinístico H=7

En los gráficos anteriores, se muestra que en algunos casos, el valor de la base (B) resulta igual para diferentes valores de S_u . En estos casos, el criterio de estabilidad predominante es el FS_{volteo} , lo que resulta coherente debido a que el valor de "Su" no interviene en el cálculo de este FS.

Si bien es cierto, el valor de la base en algunos casos permanece constante para diferentes valores de s_u , los FS correspondientes a los criterios de estabilidad (excepto en la estabilidad al volteo) incrementan a medida que el valor de S_u incrementa.

Un resumen de los criterios de estabilidad que gobiernan determinísticamente los diferentes muros de contención diseñados se muestra en los siguientes cuadros:

Cuadro 7.1-1 : Criterios de estabilidad que gobiernan el diseño determinístico – H=4m

	$s_u = 10$	$s_u = 15$	$s_u = 20$	$s_u = 25$	$s_u = 30$
$\phi = 30$	Capacidad Portante-Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo
$\phi = 32$	Capacidad Portante-Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo
$\phi = 34$	Capacidad Portante-Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo
$\phi = 36$	Capacidad Portante-Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo
$\phi = 38$	Capacidad Portante-	Seguridad	Seguridad al	Seguridad al	Seguridad al

	$s_u=10$	$s_u=15$	$s_u=20$	$s_u=25$	$s_u=30$
	Excentricidad	al Volteo	Volteo	Volteo	Volteo

Cuadro 7.1-2 : Criterios de estabilidad que gobiernan el diseño determinístico – H=5m

	$s_u=10$	$s_u=15$	$s_u=20$	$s_u=25$	$s_u=30$
$\varphi=30$	Capacidad Portante- Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo
$\varphi=32$	Capacidad Portante- Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo
$\varphi=34$	Capacidad Portante- Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo
$\varphi=36$	Capacidad Portante- Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo
$\varphi=38$	Capacidad Portante- Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo

Cuadro 7.1-3 : Criterios de estabilidad que gobiernan el diseño determinístico – H=6m

	$s_u=10$	$s_u=15$	$s_u=20$	$s_u=25$	$s_u=30$
$\varphi=30$	Capacidad Portante- Excentricidad	Capacidad Portante- Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo
$\varphi=32$	Capacidad Portante- Excentricidad	Capacidad Portante- Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo
$\varphi=34$	Capacidad Portante- Excentricidad	Capacidad Portante- Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo
$\varphi=36$	Capacidad Portante- Excentricidad	Capacidad Portante- Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo
$\varphi=38$	Capacidad Portante- Excentricidad	Capacidad Portante- Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo

Cuadro 7.1-4 : Criterios de estabilidad que gobiernan el diseño determinístico – H=7m

	$s_u=10$	$s_u=15$	$s_u=20$	$s_u=25$	$s_u=30$
$\varphi=30$	Capacidad	Capacidad Portante-	Seguridad	Seguridad	Seguridad

	$s_u=10$	$s_u=15$	$s_u=20$	$s_u=25$	$s_u=30$
	Portante-Inclinación	Excentricidad	al Volteo	al Volteo	al Volteo
$\varphi=32$	Capacidad Portante-Inclinación	Capacidad Portante-Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo
$\varphi=34$	Capacidad Portante-Inclinación	Capacidad Portante-Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo
$\varphi=36$	Capacidad Portante-Inclinación	Capacidad Portante-Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo
$\varphi=38$	Capacidad Portante-Inclinación	Capacidad Portante-Excentricidad	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo	Seguridad al Volteo

7.2 Resultados del modelo probabilístico

El alcance del presente trabajo pretende obtener expresiones que relacionen la variabilidad de los parámetros de ingreso con la variabilidad de los factores de seguridad de los criterios de estabilidad.

La variabilidad de los factores de seguridad puede ser cuantificada mediante el valor de su desviación estándar (σ). La desviación estándar representa una medida de la desviación de los datos con respecto a su valor medio, dimensionalmente, posee las mismas unidades que la variable aleatoria en análisis.

Para definir el grado de variabilidad de una variable, debe compararse el valor de la desviación estándar con el valor de la media. Por ejemplo, una desviación estándar de 1 implica una variabilidad muy grande si el valor de la media es 2 en comparación a que si el valor de la media fuera 20.

De acuerdo a lo mencionado en el párrafo anterior, dos valores de desviación estándar no pueden ser comparables si el valor de la media es diferente. En el caso de los muros de contención en estudio, los resultados diseños determinísticos indican que los valores medios de los factores de seguridad para un mismo criterio de estabilidad poseen valores diferentes para los diferentes casos estudiados. Por ejemplo, en el caso del muro de contención de $H=4$ m, $S_u=10$ ton/m² y $\varphi=30^\circ$, el valor del FS_{cp-inc} es 4.17, mientras que en el caso del muro de contención de $H=7$ m, $S_u=25$ ton/m² y $\varphi=36^\circ$, el valor del FS_{cp-inc} es 6.32.

Debido a esto, los valores de las desviaciones estándar no podrán ser empleados en las ecuaciones de regresión, pues si las medias no son iguales, un mayor valor

de desviación estándar no supondrá necesariamente una mayor variabilidad en el Factor de Seguridad.

Sin embargo, si se expresa el valor de la desviación estándar como una fracción de la media, se tendrán parámetros adimensionales que cuantifiquen la variabilidad de la variable en estudio. Este parámetro se denomina “Coeficiente de Variación”, y puede hallarse mediante la siguiente expresión:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

Dónde:

- CV : Coeficiente de variación de la variable aleatoria.
- σ : Desviación estándar de la variable aleatoria.
- \bar{x} : Media de la variable aleatoria

Debido a que el coeficiente de variación constituye un valor porcentual, dos valores de “coeficiente de variación” pueden ser comparables aun cuando los valores de la media sean diferentes, por lo que, los valores reportados de los resultados de las simulaciones probabilísticas serán los coeficientes de variación de los factores de seguridad en análisis.

7.2.1 Nomenclatura empleada en los resultados de simulaciones individuales y de grupo

Debido a que se cuentan con dos tipos de simulaciones (individuales y de grupo), en las regresiones mostradas posteriormente, para evitar confusiones, se empleará la siguiente nomenclatura:

- CV_{γ} : Coeficiente de variación del peso específico.
- CV_{ϕ} : Coeficiente de variación del ángulo de fricción interna del suelo retenido.
- CV_{su} : Coeficiente de variación de la cohesión en condiciones no drenadas del suelo de cimentación.

- $CV_{v\gamma}$: Coeficiente de variación del FS_{volteo} obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del peso específico.
- $CV_{v\phi}$: Coeficiente de variación del FS_{volteo} obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del ángulo de fricción interna del suelo retenido.
- CV_v : Coeficiente de variación del FS_{volteo} obtenido en la simulación de grupo.
- $CV_{d\gamma}$: Coeficiente de variación del $FS_{desplazamiento}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del peso específico.
- $CV_{d\phi}$: Coeficiente de variación del $FS_{desplazamiento}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del ángulo de fricción interna del suelo retenido.
- CV_{dsu} : Coeficiente de variación del $FS_{desplazamiento}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación de la cohesión en condiciones no drenadas del suelo de cimentación.
- CV_d : Coeficiente de variación del $FS_{desplazamiento}$ obtenido en la simulación de grupo.
- $CV_{ce\gamma}$: Coeficiente de variación del $FS_{capacidad\ portante-excentricidad}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del peso específico.
- $CV_{ce\phi}$: Coeficiente de variación del $FS_{capacidad\ portante-excentricidad}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del ángulo de fricción interna del suelo retenido.
- CV_{cesu} : Coeficiente de variación del $FS_{capacidad\ portante-excentricidad}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación de la cohesión en condiciones no drenadas del suelo de cimentación.
- CV_{ce} : Coeficiente de variación del $FS_{capacidad\ portante-excentricidad}$ obtenido en la simulación de grupo.

- $CV_{ci\gamma}$: Coeficiente de variación del $FS_{\text{capacidad portante-inclinación}}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del peso específico.
- $CV_{ci\Phi}$: Coeficiente de variación del $FS_{\text{capacidad portante- inclinación}}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del ángulo de fricción interna del suelo retenido.
- $CV_{ci\sigma}$: Coeficiente de variación del $FS_{\text{capacidad portante- inclinación}}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación de la cohesión en condiciones no drenadas del suelo de cimentación.
- CV_{ci} : Coeficiente de variación del $FS_{\text{capacidad portante- inclinación}}$ obtenido en la simulación de grupo.

7.2.2 Resultados y Regresiones de Simulaciones Individuales

Se denominaron simulaciones individuales a aquellas donde intervienen en cada modelo solamente una distribución probabilística (γ , S_u ó Φ), mientras que las otras dos variables permanecen constantes.

Como se indicó en la metodología, de acuerdo a los escenarios expuestos en el acápite “Variabilidad del peso específico, s_u y Φ ”, se obtuvieron 1500 simulaciones probabilísticas individuales para cada tipo de FS, totalizando 6,000 simulaciones probabilísticas de individuales para los 4 tipos de FS analizados (al volteo, al desplazamiento, por capacidad portante-excentricidad y por capacidad portante-inclinación).

Cabe resaltar que de acuerdo a las recomendaciones del Marco Teórico, cada simulación probabilística está conformada por 5,000 iteraciones determinísticas, por lo que puede considerarse que los resultados de las simulaciones individuales presentados se basan en 30'000,000 de estimaciones determinísticas.

Debido a la gran cantidad de valores obtenidos, estos se presentarán en el Anexo II que acompaña el presente trabajo.

Con los resultados obtenidos, se realizaron regresiones para encontrar expresiones numéricas que permitan estimar los valores de las simulaciones individuales,

teniendo como parámetros de ingreso los coeficientes de variación de las tres variables en estudio (γ , S_u ó Φ) y las características de los muros de contención.

7.2.2.1 Regresiones de simulaciones Individuales – Factor de Seguridad al Volteo

Las variables resultantes de las simulaciones individuales del factor de seguridad al volteo son:

- cv_{vy} : Coeficiente de variación del FSvolteo obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del peso específico.
- $cv_{v\phi}$: Coeficiente de variación del FSvolteo obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del ángulo de fricción interna del suelo retenido.

7.2.2.1.1 Regresiones cv_{vy}

Mediante una regresión se determinó que la variable cv_{vy} , puede ser estimada mediante la siguiente expresión:

$$cv_{vy} = 1.24 \cdot 10^{-4} \cdot \phi - 7.96 \cdot 10^{-4} \cdot H + 0.194 \cdot cv_{\gamma}$$

En cuanto a la “calidad” de la regresión realizada, se tiene:

- $r^2_{\text{corregido}}$: 0.9957489

El siguiente gráfico muestra una comparación entre los cv_{vy} resultantes de las simulaciones probabilísticas, y los cv_{vy} resultantes de la aplicación de la expresión obtenida.

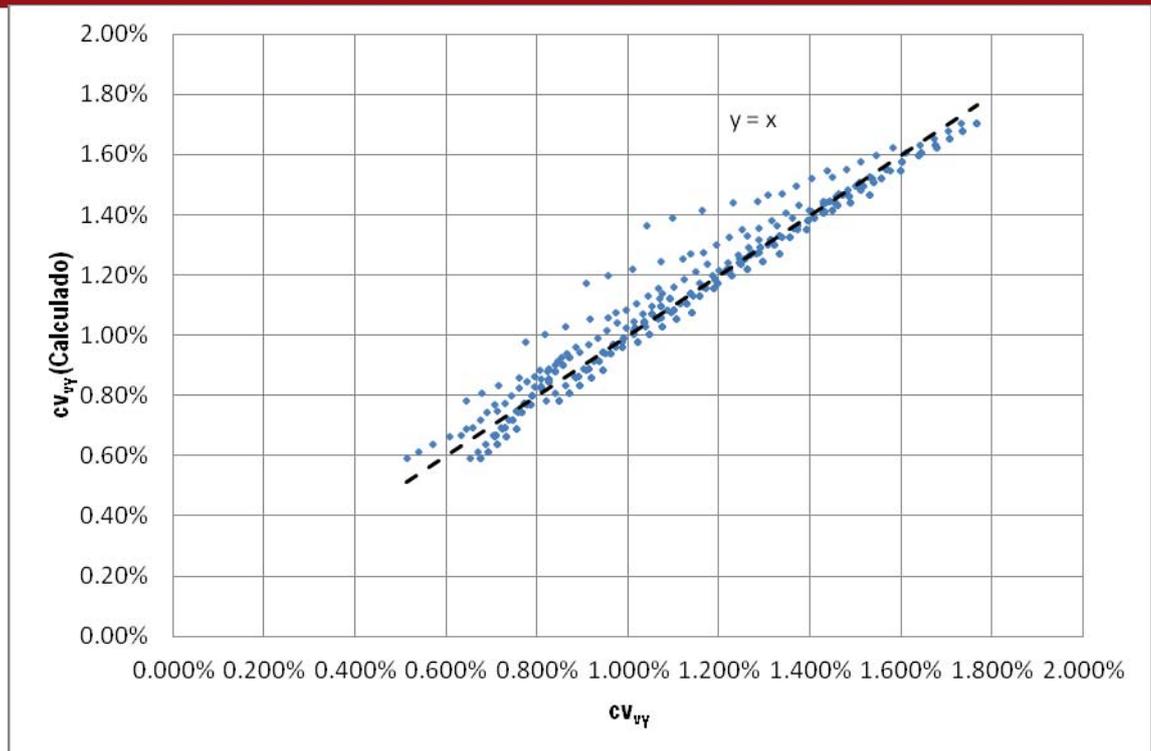


Gráfico 7.2-1 : cv_{vy} vs cv_{vy} (Calculado)

De acuerdo a los valores de r^2 reportados en la regresión y la gráfica mostrada, se prueba que la expresión calculada previamente ajusta relativamente bien los resultados obtenidos mediante las simulaciones probabilísticas individuales. Cabe resaltar que no se buscó otra expresión más compleja que ajuste mejor a los datos, debido a que (como se verá en las simulaciones de grupo), el aporte de cv_{vy} a cv_v es pequeño.

Asimismo de acuerdo a la expresión, puede verse que el cv_{vy} solamente se ve influenciado por un 20% del cv_v .

7.2.2.1.2 Regresiones $cv_{v\phi}$

Mediante una regresión se determinó que la variable $cv_{v\phi}$, puede ser estimada mediante la siguiente expresión:

$$cv_{v\phi} = 10^{-2} * (-0.22 * H^2 + 3.18 * H + 21.59) * e^{(0.03 * H^2 - 0.44 * H + 2.81)} * 10^{-2 * \phi} * cv_{\phi}$$

En cuanto a la “calidad” de la regresión realizada, se tiene:

- $R^2_{\text{Corregido}}$: 0.999693

El siguiente gráfico muestra una comparación entre los cv_{vp} resultantes de las simulaciones probabilísticas, y los cv_{vp} resultantes de la aplicación de la expresión obtenida.

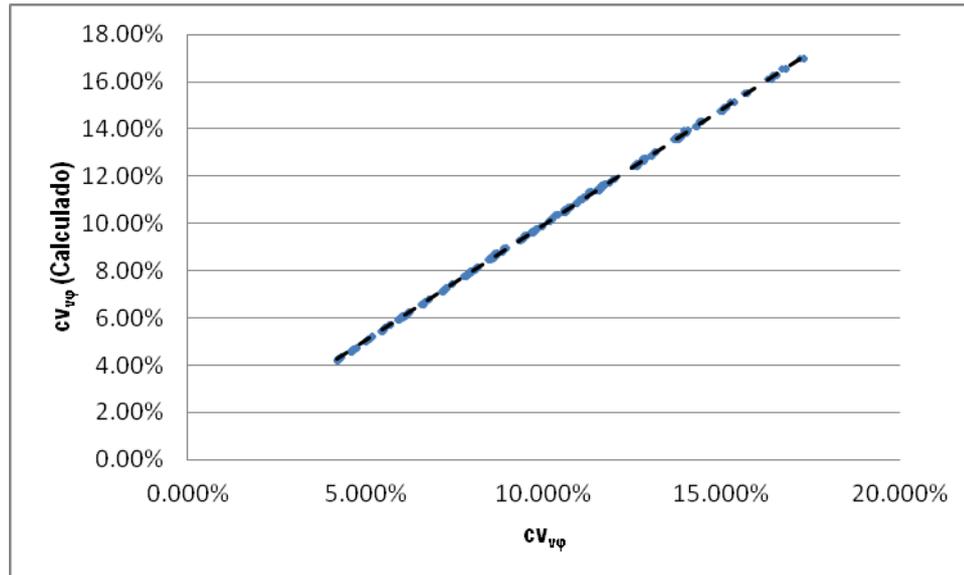


Gráfico 7.2-2 : cv_{vp} vs cv_{vp} (Calculado)

De acuerdo a los valores de $R^2_{\text{Corregido}}$ reportados en la regresión y la gráfica mostrada, se prueba que la expresión calculada previamente ajusta muy bien los resultados obtenidos mediante las simulaciones probabilísticas individuales.

Debido a que los resultados de las regresiones lineales no brindaban valores de $R^2_{\text{Corregido}}$ mayores a 0.95, se empleó una regresión múltiple exponencial que ajuste mejor a los datos, y asimismo se encontró que se obtenía una mejor correlación mediante expresiones cuadráticas para los valores de H.

Cabe resaltar que se ajustó la regresión mediante expresiones “más complejas” debido a que (como se verá en las simulaciones de grupo), el valor de cv_v depende en gran medida de cv_{vp} .

7.2.2.2 Regresiones de simulaciones Individuales – Factor de Seguridad al Desplazamiento

Las variables resultantes de las simulaciones individuales del factor de seguridad al deslizamiento son:

- cv_{dy} : Coeficiente de variación del $FS_{desplazamiento}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del peso específico.
- $cv_{d\phi}$: Coeficiente de variación del $FS_{desplazamiento}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del ángulo de fricción interna del suelo retenido.
- cv_{dsu} : Coeficiente de variación del $FS_{desplazamiento}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación de la cohesión en condiciones no drenadas del suelo de cimentación.

7.2.2.2.1 Regresiones cv_{dy}

Mediante una regresión se determinó que la variable cv_{dy} , puede ser estimada mediante la siguiente expresión:

$$cv_{dy} = 7.56 \cdot 10^{-2} - 6.29 \cdot 10^{-4} \cdot \phi + 4.68 \cdot 10^{-4} \cdot Su + 2.10 \cdot 10^{-8} \cdot H + 0.45 \cdot cv_{\gamma}$$

En cuanto a la “calidad” de la regresión realizada, se tiene:

$$R_{\text{corregido}}^2 : 0.95838$$

El siguiente gráfico muestra una comparación entre los cv_{dy} resultantes de las simulaciones probabilísticas, y los cv_{dy} resultantes de la aplicación de la expresión obtenida.

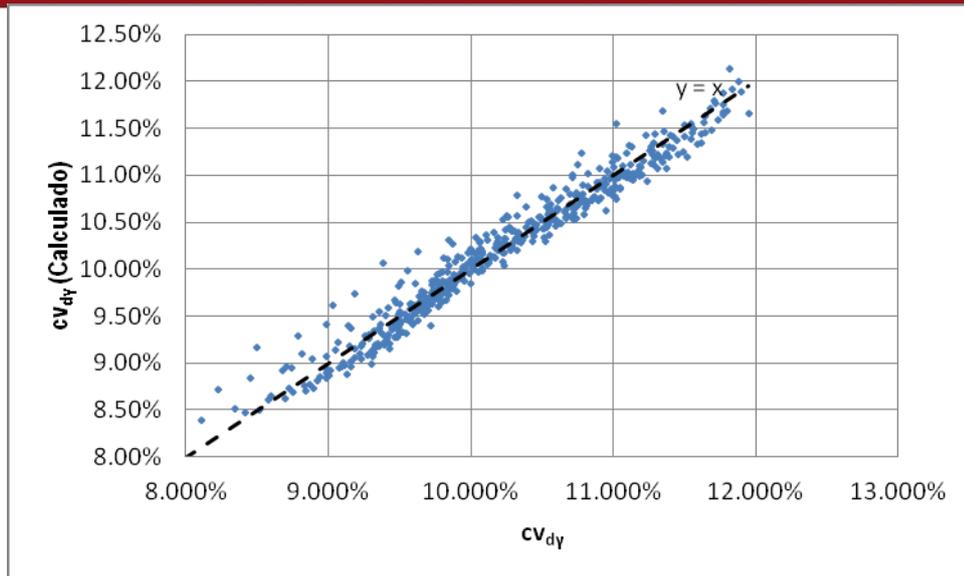


Gráfico 7.2-3 : cv_{dy} vs cv_{dy} (Calculado)

De acuerdo a los valores de $R^2_{\text{Corregido}}$ reportados en la regresión y la gráfica mostrada, se prueba que la expresión calculada previamente ajusta relativamente bien los resultados obtenidos mediante las simulaciones probabilísticas individuales.

Cabe resaltar que los resultados incluyen la variabilidad de la adhesión C_a , expresada como una función constante, truncada entre los valores $0.5 s_u$ y $0.7 s_u$; la inclusión de esta variable puede explicar la existencia del término independiente en la expresión mostrada.

7.2.2.2 Regresiones $cv_{d\phi}$

Mediante una regresión se determinó que la variable $cv_{d\phi}$, puede ser estimada mediante la siguiente expresión:

$$cv_{d\phi} = 0.1 * e^{0.073 * \phi} * cv_{\phi} + (2.354 * H - 2.222 * \phi + 121.33) * 10^{-8}$$

En cuanto a la “calidad” de la regresión realizada, se tiene:

- $R^2_{\text{Corregido}}$: 0.9871

El siguiente gráfico muestra una comparación entre los $cv_{d\phi}$ resultantes de las simulaciones probabilísticas, y los $cv_{d\phi}$ resultantes de la aplicación de la expresión obtenida.

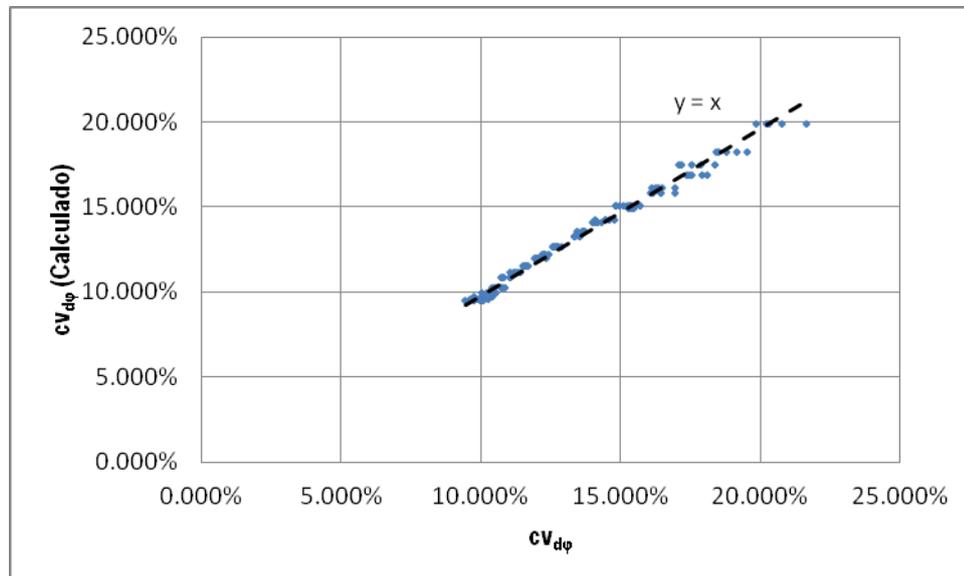


Gráfico 7.2-4 : $cv_{d\phi}$ vs $cv_{d\phi}$ (Calculado)

De acuerdo a los valores de $R^2_{\text{correctado}}$ reportados en la regresión y la gráfica mostrada, se prueba que la expresión calculada previamente ajusta muy bien los resultados obtenidos mediante las simulaciones probabilísticas individuales.

Debido a que los resultados de las regresiones lineales no brindaban valores de $R^2_{\text{correctado}}$ mayores a 0.95, se empleó una regresión múltiple exponencial que ajuste mejor a los datos.

Cabe resaltar que se ajustó la regresión mediante expresiones “más complejas” debido a que (como se verá en las simulaciones de grupo), el valor de cv_v depende en gran medida de $cv_{d\phi}$.

Asimismo, es importante señalar que los resultados incluyen la variabilidad de la adhesión Ca , expresada como una función constante, truncada entre los valores $0.5 s_u$ y $0.7 s_u$; la inclusión de esta variable puede explicar la existencia del término independiente en la expresión mostrada.

7.2.2.2.3 Regresiones cv_{dsu}

Mediante una regresión se determinó que la variable cv_{dsu} , puede ser estimada mediante la siguiente expresión:

$$cv_{dsu} = 4.98 \cdot 10^{-2} - 1.63 \cdot 10^{-3} \cdot \varphi + 1.19 \cdot 10^{-3} \cdot S_{\text{su}} + 4.81 \cdot 10^{-3} \cdot H + 0.786 \cdot cv_{\text{su}}$$

En cuanto a la “calidad” de la regresión realizada, se tiene:

$$R^2_{\text{corregido}} : 0.99582$$

El siguiente gráfico muestra una comparación entre los cv_{dsu} resultantes de las simulaciones probabilísticas, y los cv_{dsu} resultantes de la aplicación de la expresión obtenida.

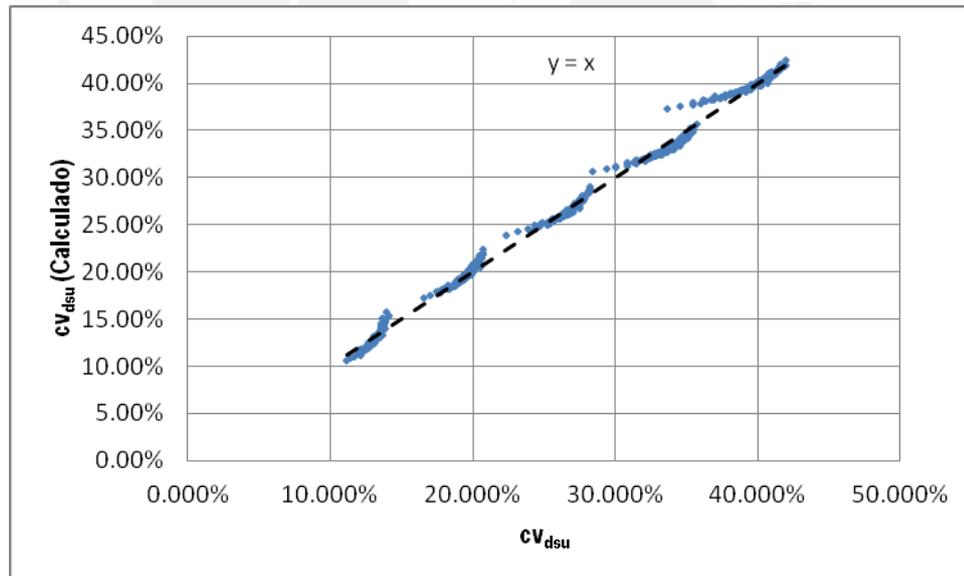


Gráfico 7.2-5 : cv_{dsu} vs cv_{dsu} (Calculado)

De acuerdo a los valores de $R^2_{\text{corregido}}$ reportados en la regresión y la gráfica mostrada, se prueba que la expresión calculada previamente ajusta muy bien los resultados obtenidos mediante las simulaciones probabilísticas individuales.

Cabe resaltar que los resultados incluyen la variabilidad de la adhesión C_a , expresada como una función constante, truncada entre los valores $0.5 s_u$ y $0.7 s_u$; la inclusión de esta variable puede explicar la existencia del término independiente en la expresión mostrada.

7.2.2.3 Regresiones de simulaciones Individuales – Factor de Seguridad por Capacidad Portante - excentricidad

Las variables resultantes de las simulaciones individuales del factor de seguridad por Capacidad Portante - excentricidad son:

- $cv_{ce\gamma}$: Coeficiente de variación del $FS_{\text{capacidad portante-excentricidad}}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del peso específico.
- $cv_{ce\phi}$: Coeficiente de variación del $FS_{\text{capacidad portante-excentricidad}}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del ángulo de fricción interna del suelo retenido.
- cv_{cesu} : Coeficiente de variación del $FS_{\text{capacidad portante-excentricidad}}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación de la cohesión en condiciones no drenadas del suelo de cimentación.

7.2.2.3.1 Regresiones $cv_{ce\gamma}$

Mediante una regresión se determinó que la variable $cv_{ce\gamma}$, puede ser estimada mediante la siguiente expresión:

$$cv_{ce\gamma} = -4.23 \cdot 10^{-8} - 1.26 \cdot 10^{-4} \cdot \phi + 4.62 \cdot 10^{-4} \cdot S_M - 2.11 \cdot 10^{-4} \cdot H + 0.812 \cdot cv_{\gamma}$$

En cuanto a la “calidad” de la regresión realizada, se tiene:

$$R_{\text{corregido}}^2 : 0.94769349$$

El siguiente gráfico muestra una comparación entre los cv_{cey} resultantes de las simulaciones probabilísticas, y los cv_{cey} resultantes de la aplicación de la expresión obtenida.

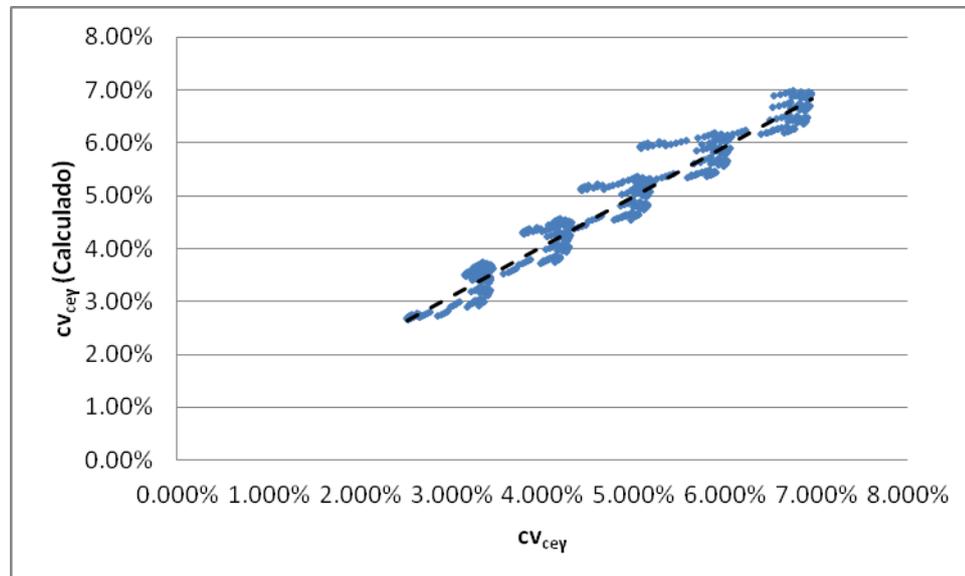


Gráfico 7.2-6 : cv_{cey} vs cv_{cey} (Calculado)

De acuerdo a los valores de r^2 corregido reportados en la regresión y la gráfica mostrada, se prueba que la expresión calculada previamente ajusta relativamente bien los resultados obtenidos mediante las simulaciones probabilísticas individuales.

Cabe resaltar que los resultados incluyen la variabilidad de la adhesión C_a , expresada como una función constante, truncada entre los valores $0.5 s_u$ y $0.7 s_u$; la inclusión de esta variable puede explicar la existencia del término independiente en la expresión mostrada.

7.2.2.3.2 Regresiones $cv_{ce\phi}$

Mediante una regresión se determinó que la variable $cv_{ce\phi}$, puede ser estimada mediante las siguientes expresiones:

- Para $S_u=10$ ton/m²:

$$cv_{ce\phi} = 2.94 \cdot 10^{-8} + 5.81 \cdot 10^{-8} \cdot \phi - 3.67 \cdot 10^{-2} \cdot H + 1.62 \cdot cv_{\phi}$$

- Para $S_u \geq 15 \text{ ton/m}^2$:

$$cv_{ce\phi} = -2.73 \cdot 10^{-1} + 8.50 \cdot 10^{-6} \cdot \phi + 1.03 \cdot 10^{-6} \cdot S_u - 7.62 \cdot 10^{-6} \cdot H + 2.97 \cdot cv_{\phi}$$

En cuanto a la “calidad” de las regresiones realizadas, se tiene:

- Para $S_u = 10 \text{ ton/m}^2$: $R^2_{\text{correctado}} = 0.92631$
- Para $S_u \geq 15 \text{ ton/m}^2$: $R^2_{\text{correctado}} = 0.95838$

Los siguientes gráficos muestra una comparación entre los $cv_{ce\phi}$ resultantes de las simulaciones probabilísticas, y los $cv_{ce\phi}$ resultantes de la aplicación de la expresión obtenida.

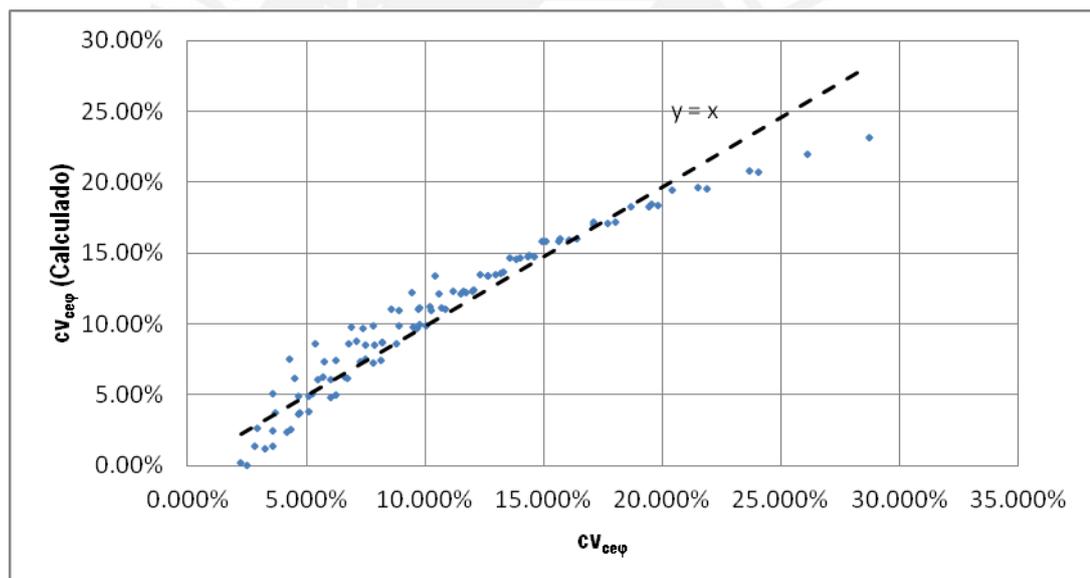


Gráfico 7.2-7 : $cv_{ce\phi}$ vs $cv_{ce\phi}$ (Calculado) - para $S_u = 10 \text{ ton/m}^2$

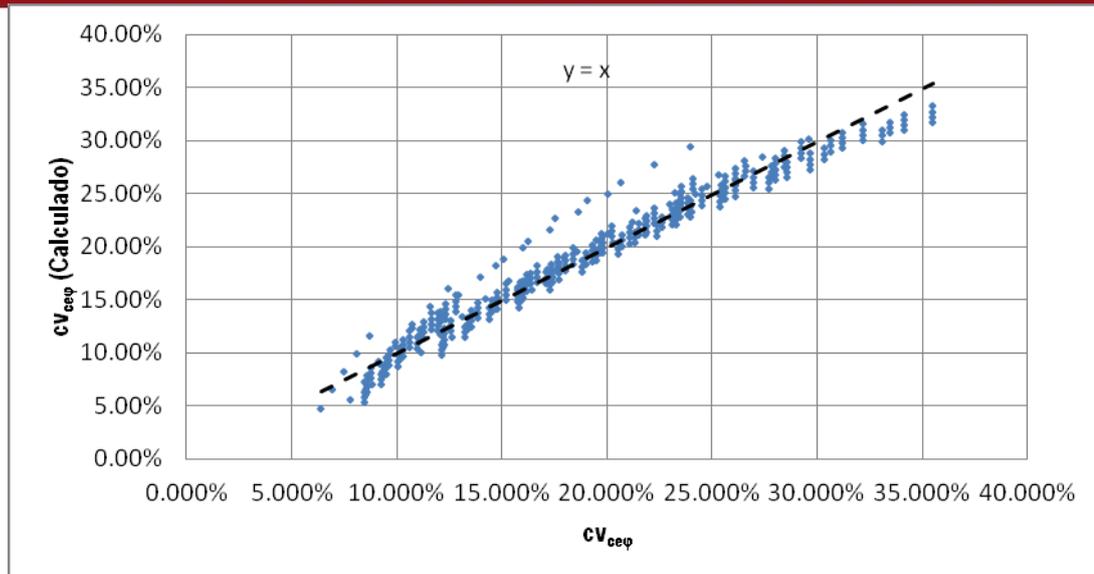


Gráfico 7.2-8 : cv_{cep} vs cv_{cep} (Calculado) - para $Su \geq 15$ ton/m²

El presente caso constituyó una excepción en las regresiones realizadas, debido a que no se pudieron encontrar expresiones (con un valor elevado de $R^2_{correctado}$) que gobiernen todo el rango de valores “Su” para estimar el cv_{cep} . Esto se debe a que en los casos donde el criterio de estabilidad predominante es la capacidad portante, los FS_{cp-e} son muy sensibles a cambiar en pequeños cambios del valor de la base (B); de acuerdo al análisis de “Criterios de estabilidad que gobiernan el diseño determinístico”, en todos los casos donde $Su=10$ ton/m² el criterio de estabilidad predominante es la capacidad portante, se vio por conveniente tratar por separado los casos “ $Su=10$ ton/m²”, y “ $Su \geq 15$ ton/m²”.

En cuanto al caso $Su=10$ ton/m², de acuerdo a los valores de $R^2_{correctado}$ reportados en la regresión y la gráfica mostrada, se prueba que la expresión calculada previamente ajusta de manera aproximada los resultados obtenidos mediante las simulaciones probabilísticas individuales.

En cuanto al caso $Su \geq 15$ ton/m², de acuerdo a los valores de $R^2_{correctado}$ reportados en la regresión y la gráfica mostrada, se prueba que la expresión calculada previamente ajusta relativamente bien los resultados obtenidos mediante las simulaciones probabilísticas individuales.

Asimismo, es importante señalar que los resultados incluyen la variabilidad de la adhesión C_a , expresada como una función constante, truncada entre los valores

$0.5 s_u$ y $0.7 s_u$; la inclusión de esta variable puede explicar la existencia del término independiente en las expresiones mostradas.

7.2.2.3 Regresiones cv_{cesu}

Mediante una regresión se determinó que la variable cv_{cesu} , puede ser estimada mediante la siguiente expresión:

$$cv_{cesu} = 4.03 \cdot 10^{-9} + 2.76 \cdot 10^{-4} \cdot S_u + 0.918 \cdot cv_{su}$$

En cuanto a la “calidad” de la regresión realizada, se tiene:

$$R^2_{\text{corregido}} : 0.9979$$

El siguiente gráfico muestra una comparación entre los cv_{cesu} resultantes de las simulaciones probabilísticas, y los cv_{cesu} resultantes de la aplicación de la expresión obtenida.

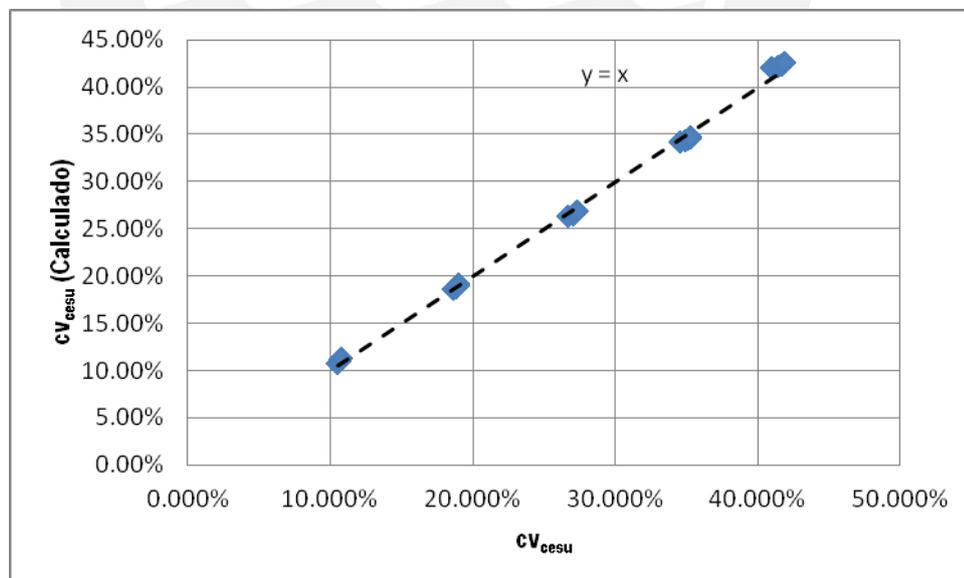


Gráfico 7.2-9 : cv_{cesu} vs cv_{cesu} (Calculado)

De acuerdo a los valores de $F_{\text{corregido}}$ reportados en la regresión y la gráfica mostrada, se prueba que la expresión calculada previamente ajusta muy bien los resultados obtenidos mediante las simulaciones probabilísticas individuales.

Cabe resaltar que los resultados incluyen la variabilidad de la adhesión C_a , expresada como una función constante, truncada entre los valores $0.5 s_u$ y $0.7 s_u$; la inclusión de esta variable puede explicar la existencia del término independiente en la expresión mostrada.

7.2.2.4 Regresiones de simulaciones Individuales – Factor de Seguridad por Capacidad Portante - inclinación

Las variables resultantes de las simulaciones individuales del factor de seguridad por Capacidad Portante - inclinación son:

- cv_{civ} : Coeficiente de variación del $FS_{\text{capacidad portante-inclinación}}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del peso específico.
- $cv_{ci\phi}$: Coeficiente de variación del $FS_{\text{capacidad portante- inclinación}}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación del ángulo de fricción interna del suelo retenido.
- cv_{cis_u} : Coeficiente de variación del $FS_{\text{capacidad portante- inclinación}}$ obtenido en la simulación individual, en el caso que se considera solamente la variación de la cohesión en condiciones no drenadas del suelo de cimentación.

7.2.2.4.1 Regresiones cv_{civ}

Mediante una regresión se determinó que la variable cv_{civ} , puede ser estimada mediante la siguiente expresión:

$$cv_{civ} = 8.46 \cdot 10^{-6} - 6.84 \cdot 10^{-4} \cdot \phi + 7.77 \cdot 10^{-6} \cdot S_u + 2.32 \cdot 10^{-6} \cdot H + 0.75 \cdot cv_{\gamma}$$

En cuanto a la “calidad” de la regresión realizada, se tiene:

$R^2_{\text{Corregido}}$: 0.98974

El siguiente gráfico muestra una comparación entre los $cv_{ci\varphi}$ resultantes de las simulaciones probabilísticas, y los $cv_{ci\varphi}$ resultantes de la aplicación de la expresión obtenida.

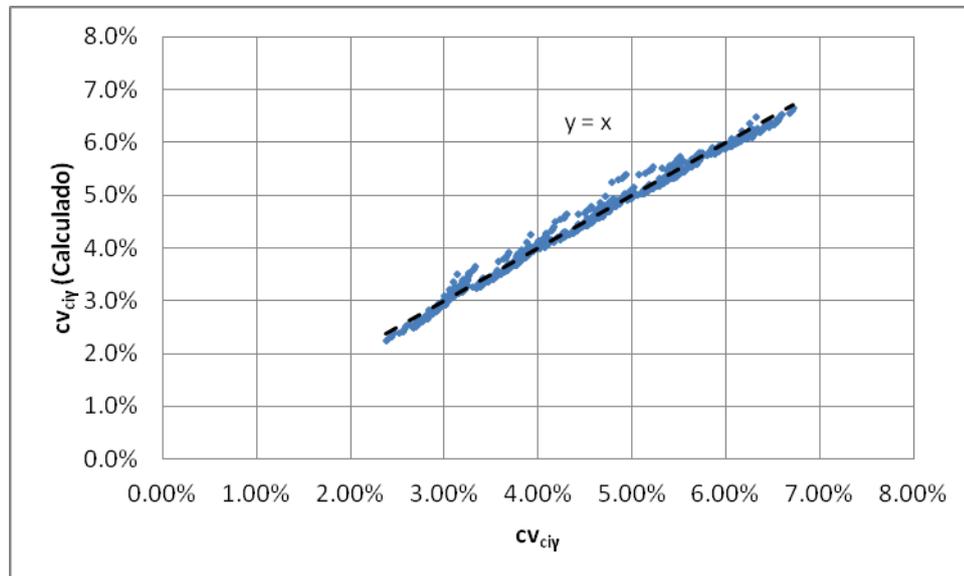


Gráfico 7.2-10 : $cv_{ci\varphi}$ vs $cv_{ci\varphi}$ (Calculado)

De acuerdo a los valores de $R^2_{\text{Corregido}}$ reportados en la regresión y la gráfica mostrada, se prueba que la expresión calculada previamente ajusta relativamente bien los resultados obtenidos mediante las simulaciones probabilísticas individuales.

Cabe resaltar que los resultados incluyen la variabilidad de la adhesión Ca , expresada como una función constante, truncada entre los valores $0.5 s_u$ y $0.7 s_u$; la inclusión de esta variable puede explicar la existencia del término independiente en la expresión mostrada.

7.2.2.4.2 Regresiones $cv_{ci\varphi}$

Mediante una regresión se determinó que la variable $cv_{ci\varphi}$, puede ser estimada mediante la siguiente expresión:

$$cv_{ci\phi} = -0.54 \cdot 10^{-2} + 2.59 \cdot 10^{-8} \cdot \phi + 4.22 \cdot 10^{-4} \cdot Su - 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot H + 1.12 \cdot cv_{\phi}$$

En cuanto a la “calidad” de la regresión realizada, se tiene:

$$R^2_{\text{corregido}} = 0.96094$$

El siguiente gráfico muestra una comparación entre los $cv_{ci\phi}$ resultantes de las simulaciones probabilísticas, y los $cv_{ci\phi}$ resultantes de la aplicación de la expresión obtenida.

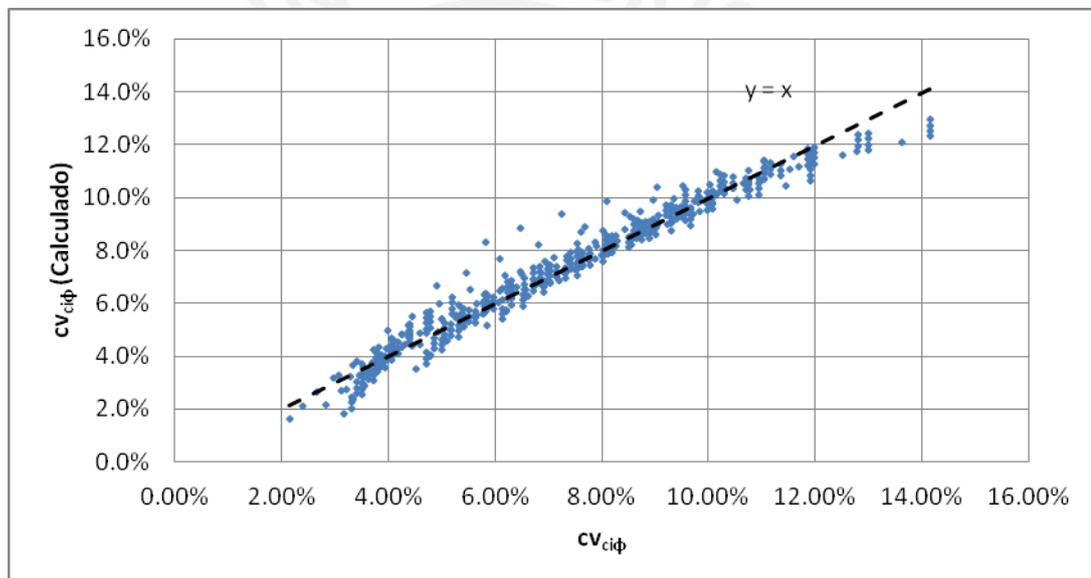


Gráfico 7.2-11 : $cv_{ci\phi}$ vs $cv_{ci\phi}$ (Calculado)

De acuerdo a los resultados, se encontró que el comportamiento de $cv_{ci\phi}$ era similar al presentado para $cv_{ce\phi}$, es decir, se presentaba una mejor correlación si los casos correspondientes a “Su=10 ton/m²”, y “Su≥15 ton/m²” se tratan por separado.

Sin embargo en el caso de $cv_{ci\phi}$, el hecho de analizar todos los datos como un conjunto (y no separar los datos en las categorías “Su=10 ton/m²”, y “Su≥15 ton/m²”) no induce un error significativo, pues se cuenta con un valor relativamente alto de $R^2_{\text{corregido}}$.

Asimismo, es importante señalar que los resultados incluyen la variabilidad de la adhesión Ca, expresada como una función constante, truncada entre los valores $0.5 s_u$ y $0.7 s_u$; la inclusión de esta variable puede explicar la existencia del término independiente en las expresiones mostradas.

7.2.2.4.3 Regresiones cv_{cisu}

Mediante una regresión se determinó que la variable cv_{cisu} , puede ser estimada mediante la siguiente expresión:

$$cv_{cisu} = 2.48 \cdot 10^{-5} - 1.05 \cdot 10^{-5} \cdot H + 0.954 \cdot cv_{su}$$

En cuanto a la “calidad” de la regresión realizada, se tiene:

$$R^2_{\text{corregido}} : 0.9968$$

El siguiente gráfico muestra una comparación entre los cv_{cisu} resultantes de las simulaciones probabilísticas, y los cv_{cisu} resultantes de la aplicación de la expresión obtenida.

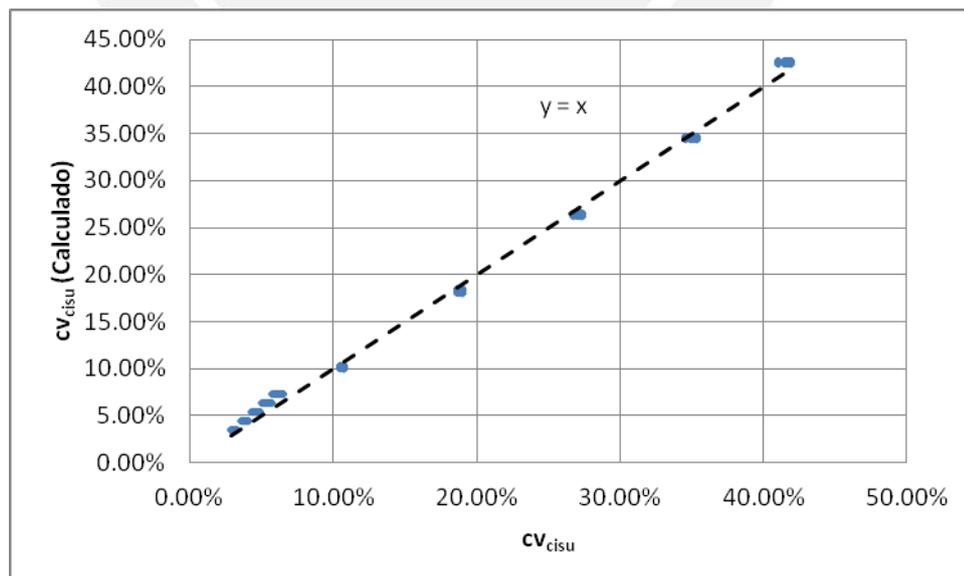


Gráfico 7.2-12 : cv_{cisu} vs cv_{cisu} (Calculado)

De acuerdo a los valores de R^2 reportados en la regresión y la gráfica mostrada, se prueba que la expresión calculada previamente ajusta muy bien los resultados obtenidos mediante las simulaciones probabilísticas individuales.

Cabe resaltar que los resultados incluyen la variabilidad de la adhesión C_a , expresada como una función constante, truncada entre los valores $0.5 s_u$ y $0.7 s_u$; la inclusión de esta variable puede explicar la existencia del término independiente en la expresión mostrada.

7.2.3 Resultados y Regresiones de Simulaciones de Grupo

Se denominaron simulaciones de grupo a aquellas en las que intervienen en el modelo las distribuciones probabilísticas de las tres variables en estudio.

Como se indicó en la metodología, se escogieron 15 casos de combinaciones de coeficientes de variación de los parámetros en estudio para cada muro de contención diseñado determinísticamente, resultando 1,500 simulaciones probabilísticas de grupo para cada tipo de FS, totalizando 6,000 simulaciones probabilísticas de grupo. Asimismo, cada simulación probabilística está conformada por 5,000 iteraciones determinísticas, por lo que puede considerarse que los resultados de simulaciones de grupo presentados se basan en 30'000,000 de estimaciones determinísticas.

Debido a la gran cantidad de valores obtenidos, estos se presentarán en el Anexo III que acompaña el presente trabajo.

Con los resultados obtenidos, se realizaron regresiones para encontrar expresiones numéricas que permitan estimar los valores de las simulaciones de grupo, teniendo como parámetro de ingreso las simulaciones individuales para cada criterio de estabilidad.

7.2.3.1 Regresiones de simulaciones de grupo – Factor de Seguridad al Volteo

Se determinó mediante una regresión, que el coeficiente de variación del FS_{volteo} , puede ser estimado mediante la siguiente expresión:

$$cv_V = 0.123 \cdot cv_{VY} + 0.992 \cdot cv_{V\phi}$$

En cuanto a la “calidad” de la regresión realizada, se tiene:

- $r^2_{\text{correctado}}$: 0.99997

El siguiente gráfico muestra una comparación entre los cv_v resultantes de las simulaciones probabilísticas, y los cv_v resultantes de la aplicación de la expresión obtenida.

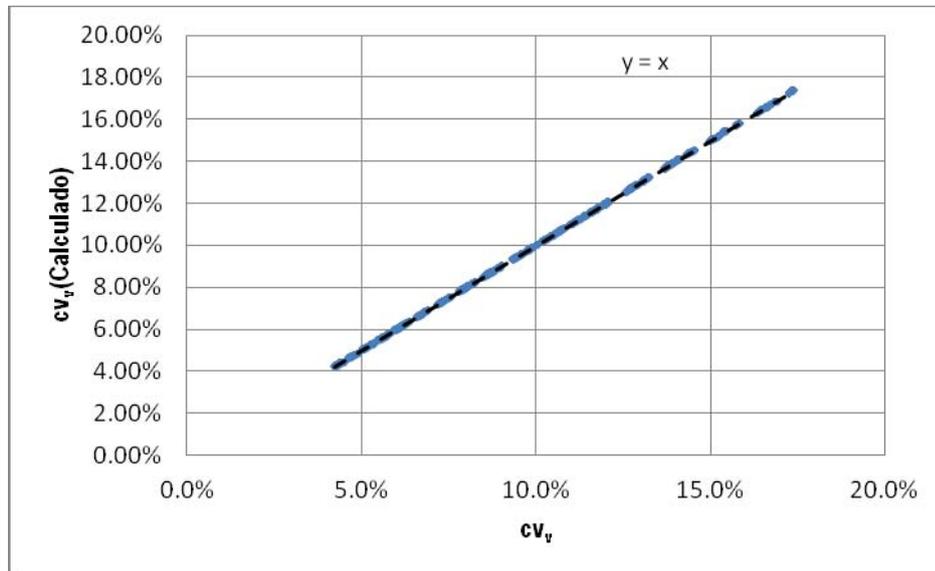


Gráfico 7.2-13 : cv_v vs cv_v (Calculado)

De acuerdo a los valores de $r^2_{\text{correctado}}$ reportados en la regresión y la gráfica mostrada, se prueba que la expresión calculada previamente ajusta muy bien los resultados obtenidos mediante las simulaciones probabilísticas de grupo.

Asimismo de acuerdo a la expresión, puede verse que el CTV_{volteo} tiene mayor preponderancia en el cálculo de cv_v , en comparación a $CTV_{\text{deslizamiento}}$.

Los resultados obtenidos guardan una estrecha relación con el análisis de sensibilidad presentado en el Anexo I, donde se muestra que el FS_{volteo} es mucho más sensible ante cambios en el valor de ϕ que ante cambios en el valor de γ .

7.2.3.2 Regresiones de simulaciones de grupo – Factor de Seguridad al Desplazamiento

Se determinó mediante una regresión, que el coeficiente de variación del $FS_{\text{deslizamiento}}$, puede ser estimado mediante la siguiente expresión:

$$cv_d = -4.11 \cdot 10^{-2} - 5.57 \cdot 10^{-4} \cdot H + 0.152 \cdot cv_{dy} + 0.608 \cdot cv_{d\phi} + 0.902 \cdot cv_{dSu}$$

En cuanto a la “calidad” de la regresión realizada, se tiene:

- $r^2_{\text{Corregido}}$: 0.99705

El siguiente gráfico muestra una comparación entre los cv_d resultantes de las simulaciones probabilísticas, y los cv_d resultantes de la aplicación de la expresión obtenida.

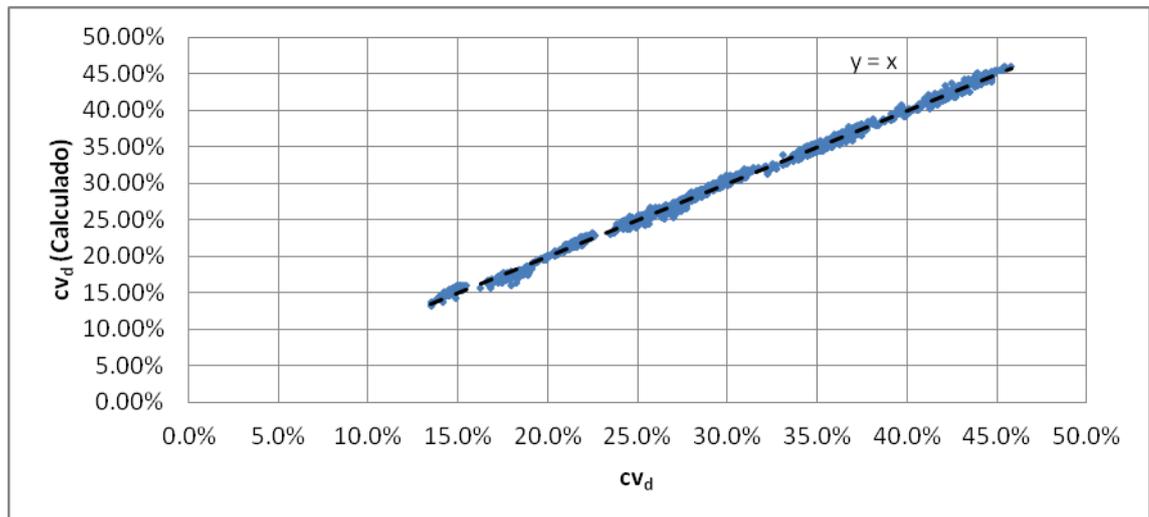


Gráfico 7.2-14 : cv_d vs cv_d (Calculado)

De acuerdo a los valores de $r^2_{\text{Corregido}}$ reportados en la regresión y la gráfica mostrada, se prueba que la expresión calculada previamente ajusta muy bien los resultados obtenidos mediante las simulaciones probabilísticas de grupo.

Asimismo de acuerdo a la expresión, puede verse que el cv_{dSu} tiene mayor preponderancia en el cálculo de cv_d , en comparación a $cv_{d\phi}$, y este último tiene mayor influencia en comparación a cv_{dy} .

Los resultados presentados guardan una estrecha relación con el análisis de sensibilidad presentado en el Anexo I, donde se muestra que el $FS_{\text{deslizamiento}}$ muestra mayor sensibilidad ante los cambios de Su que ante los cambios de ϕ , y asimismo las variaciones de ϕ son más sensibles que las variaciones de γ en el cálculo del valor del $FS_{\text{deslizamiento}}$.

Es importante resaltar que la expresión estimada mediante la regresión, posee un término independiente y otro que depende de la altura; se añadieron estos términos a la regresión para obtener un mayor valor de r^2 , por lo que esta expresión puede considerarse válida solamente en el rango de valores de las simulaciones realizadas.

7.2.3.3 Regresiones de simulaciones de grupo – Factor de Seguridad por Capacidad Portante-Excentricidad

Se determinó mediante una regresión, que el coeficiente de variación del FS_{cp-e} , puede ser estimado mediante la siguiente expresión:

$$cv_{ce} = 0.265 \cdot cv_{cey} + 0.596 \cdot cv_{cep} + 0.818 \cdot cv_{cesx}$$

En cuanto a la “calidad” de la regresión realizada, se tiene:

- $r^2_{\text{corregido}}$: 0.9985

El siguiente gráfico muestra una comparación entre los cv_{ce} resultantes de las simulaciones probabilísticas, y los cv_{ce} resultantes de la aplicación de la expresión obtenida.

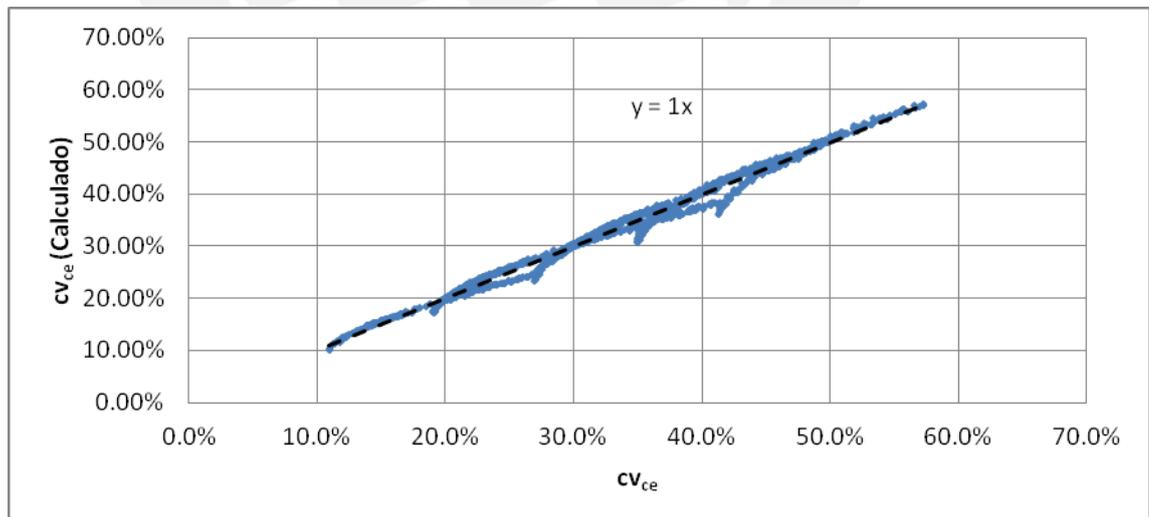


Gráfico 7.2-15 : cv_{ce} vs cv_{ce} (Calculado)

De acuerdo a los valores de $r^2_{\text{corregido}}$ reportados en la regresión y la gráfica mostrada, se prueba que la expresión calculada previamente ajusta muy bien los resultados obtenidos mediante las simulaciones probabilísticas de grupo.

Asimismo de acuerdo a la expresión, puede verse que el $CV_{\phi_{Su}}$ tiene mayor preponderancia en el cálculo de CV_{CF} , en comparación a $CV_{CF_{\phi}}$, y este último tiene mayor influencia en comparación a $CV_{CF_{\gamma}}$.

Los resultados mostrados guardan una estrecha relación con el análisis de sensibilidad presentado en el Anexo I, donde se muestra que el FS_{cp-e} muestra mayor sensibilidad ante los cambios de S_u que ante los cambios de ϕ , y asimismo las variaciones de ϕ son más sensibles que las variaciones de γ en el cálculo del valor del FS_{cp-e} .

7.2.3.4 Regresiones de simulaciones de grupo – Factor de Seguridad por Capacidad Portante-Inclinación

Se determinó mediante una regresión, que el coeficiente de variación del FS_{cp-i} , puede ser estimado mediante la siguiente expresión:

$$CV_{CF} = 0.206 \cdot CV_{CF_{\gamma}} + 0.333 \cdot CV_{CF_{\phi}} + 0.937 \cdot CV_{CF_{Su}}$$

En cuanto a la “calidad” de la regresión realizada, se tiene:

- $r^2_{\text{correctado}}$: 0.9991

El siguiente gráfico muestra una comparación entre los CV_{CF} resultantes de las simulaciones probabilísticas, y los CV_{CF} resultantes de la aplicación de la expresión obtenida.

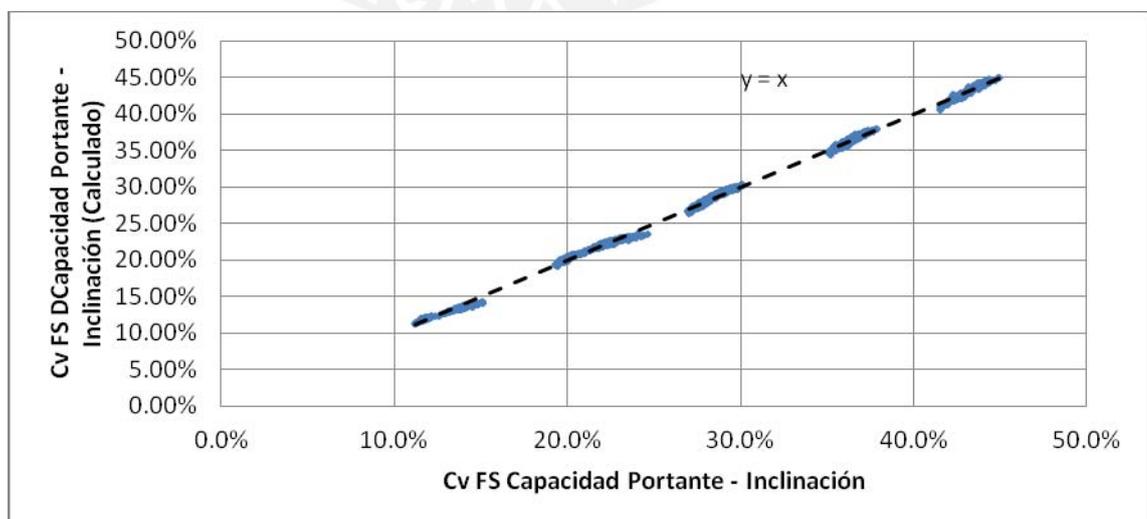


Gráfico 7.2-16 : cv_{ci} vs cv_{ci} (Calculado)

De acuerdo a los valores de R^2 corregido reportados en la regresión y la gráfica mostrada, se prueba que la expresión calculada previamente ajusta muy bien los resultados obtenidos mediante las simulaciones probabilísticas de grupo.

Asimismo de acuerdo a la expresión, puede verse que el CV_{ctm} tiene mayor preponderancia en el cálculo de CV_{ct} , en comparación a CV_{cte} , y este último, mayor influencia en comparación a CV_{ctf} .

Los resultados guardan una estrecha relación con el análisis de sensibilidad presentado en el Anexo I, donde se muestra que el FS_{cp-i} muestra mayor sensibilidad ante los cambios de S_u que ante los cambios de ϕ , y asimismo las variaciones de ϕ son más sensibles que las variaciones de γ en el cálculo del valor del FS_{cp-i} .



8 CONCLUSIONES

- Los análisis determinísticos no resultan adecuados para optimizar el diseño de una estructura, pues al no cuantificar la variabilidad existente en el diseño no permiten estimar valores adecuados de factores de seguridad en función a la importancia de la estructura.
- El Método Montecarlo constituye una importante herramienta probabilística para la evaluación y análisis de la incertidumbre, pues permite cuantificar la variabilidad en el diseño. Mediante la cuantificación de la variabilidad de los factores de seguridad, y en función a una “probabilidad de falla aceptable” (definida por la importancia de la estructura), se pueden estimar valores adecuados de factores de seguridad para el diseño de esta.
- Los resultados a obtener en un diseño probabilístico dependen en gran medida de la calidad de los parámetros estadísticos de entrada, estos deben estimarse adecuadamente mediante:
 - Ajustes de los datos provenientes de ensayos in –situ y/o ensayos en laboratorio a distribuciones probabilísticas, empleando pruebas de bondad de ajuste como “Smirnov – Kolmogorov”, “Anderson – Darling”, “Chi – cuadrado”, etc.
 - Criterio de un especialista, basado en datos provenientes de ensayos y/o observaciones en campo.
- Un análisis probabilístico permite optimizar el diseño en función de la importancia de la estructura y la variabilidad de involucrada en el diseño, realizando un análisis costo- beneficio y determinando una “probabilidad de falla aceptable”.
- En el trabajo de tesis se realizaron 100 diseños determinísticos y 3000 simulaciones probabilísticas (que comprenden 60´000,000 iteraciones), dando como resultado expresiones numéricas (obtenidas mediante regresiones con valores de ~~Corregido~~ muy cercanos a 1) que permiten estimar la variabilidad de los factores de seguridad de los muros de contención en estudio.
- Debido al gran número de expresiones encontradas, el análisis de cada una se realizó en el ítem correspondiente a “Resultados”, sin embargo, mediante un análisis macro se concluye que la variabilidad de los factores de seguridad (en orden de importancia) se ve influenciada por:

- Coeficiente de variación de la cohesión en condiciones no drenadas del suelo de cimentación (S_u)
 - Coeficiente de variación del ángulo de fricción interna del suelo retenido (Φ)
 - Coeficiente de variación del peso específico del suelo retenido (γ)
 - Altura (H), cohesión en condiciones no drenadas del suelo de cimentación (S_u) y el ángulo de fricción interna del suelo retenido (Φ).
- Las expresiones obtenidas en el ítem correspondiente a “Resultados” permiten estimar los coeficientes de variación de las funciones de densidad correspondientes a los factores de seguridad de las condiciones de estabilidad de los muros de contención en estudio (estabilidad al volteo, al desplazamiento y por capacidad portante). Con los valores previamente hallados, definiendo una probabilidad de falla de acuerdo a la importancia de la estructura, puede estimarse un “Factor de Seguridad de Diseño” por cada condición de estabilidad, con los que debería realizarse el diseño final de la estructura (Ver ejemplo de Diseño en el Anexo IV).
 - Un mayor factor de seguridad para cierta condición de estabilidad no garantiza que su probabilidad de falla sea menor en comparación a otra condición de estabilidad con menor factor de seguridad. El Anexo IV muestra un ejemplo en el que, a pesar que el “ FS_{volteo} ” tiene el menor valor, posee el mayor índice de confiabilidad (por lo tanto menor probabilidad de falla).

9 BIBLIOGRAFÍA

BAECHER, Gregory B.

2003 *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. England: Wiley.

BENMEDDOUR, D.

2012 “Numerical study of passive and active earth pressures of sands”
Computers and Geotechnics 40 pp.34-44

BOWLES, Joseph E.

1982 *Propiedades Geofísicas de los Suelos*. Primera Edición. Bogotá:
McGraw Hill Latinoamericana.

1988 *Foundation, Analysis and Design*. Fourth Edition. United States of
America: McGraw Hill Inc.

CHERUNINI, Claudio

2001 “Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering -
Discussion” *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*.
August-2001 pp.700-721

CRESPO TAIBO, Carlos

2002 *Confiabilidad del Diseño en Geotecnia*. Sartenejas, Venezuela:
Universidad Simón Bolívar

DAS, Braja M.

2006 *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*. Quinta Edición. México
D.F.: Thomson Learning.

DUNCAN, Michael

2000 "Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering"
Journal of Geotechnical and Environmental Engineering. Vol.126
pp.307-316

EL-RAMLY, H. y N.R. Morgestern

2003 "Reply to the discussion by J.M. Duncan, M. Navin, and T.F. Wolff on
"Probabilistic slope stability analysis for practice"" *Canadian
Geotechnical Journal*. Vol.40 pp.851-855

HENRIQUES RIBEIRO, Romulo Castello

2008 *Aplicações de Probabilidade e Estatística em Análises Geotécnicas*.
Tesis de Doctorado en Ingeniería Civil. Río de Janeiro: Pontificia
Universidade Católica do Rio de Janeiro

HIDALGO MONTOYA, César Augusto y PACHECHO DE ASSIS, André

2011 a "Herramientas Para Análisis por Confiabilidad en Geotécnia: Teoría"
Revista Ingenierias Universidad de Medellín. Medellín vol.10 pp.69-
78

2011 b "Herramientas Para Análisis por Confiabilidad en Geotécnia:
Aplicación" *Revista Ingenierias Universidad de Medellín*. Medellín
vol.10 pp.79-86

HOLTZ, Robert y William Kovacs

1981 *An Introduction to Geotechnical Engineering* . United States of
America: Prentice – Hall Inc.

JUAREZ BADILLO, Eulalio y Alfonso RICO RODRIGUEZ

2005 *Fundamentos de la Mecánica de Suelos (Tomo I)* . Mexico: Limusa

PALISADE

- 2010 *Guía para el uso de @Risk – Versión 5.7.* New York: Palisade Corporation
- PHOON, Kok-Kwang
- 2008 *Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering: Computations and Applications* United States of America: Taylor & Francis.
- PRADA, Felipe y Alfonso RAMOS
- 2011 “Confiabilidad Aplicada al Diseño de un Muro de Contención” *Obras y Proyectos 9.* Colombia pp.49-58
- TERZAGHI, Karl
- 1963 *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica .* Mexico: El Ateneo
- US ARMY OF CORPOS ENGINEERS
- 1999 *Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies.* ETL1110-2-556, USACE
- ZEVGOLIS, Ioannis
- 2010 “Probabilistic Analysis of Retaining Walls” *Computers and Geotechnics 37* pp.359-373
- ZHOU, Yun
- 2006 “*Geotechnical Engineering: Earth Retaining Structures*”. Publication No. FHWA NHI-06-089. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.