

**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**

**ANEXOS**

**ASESOR: Ing. Guillermo José Zavala Rosell**

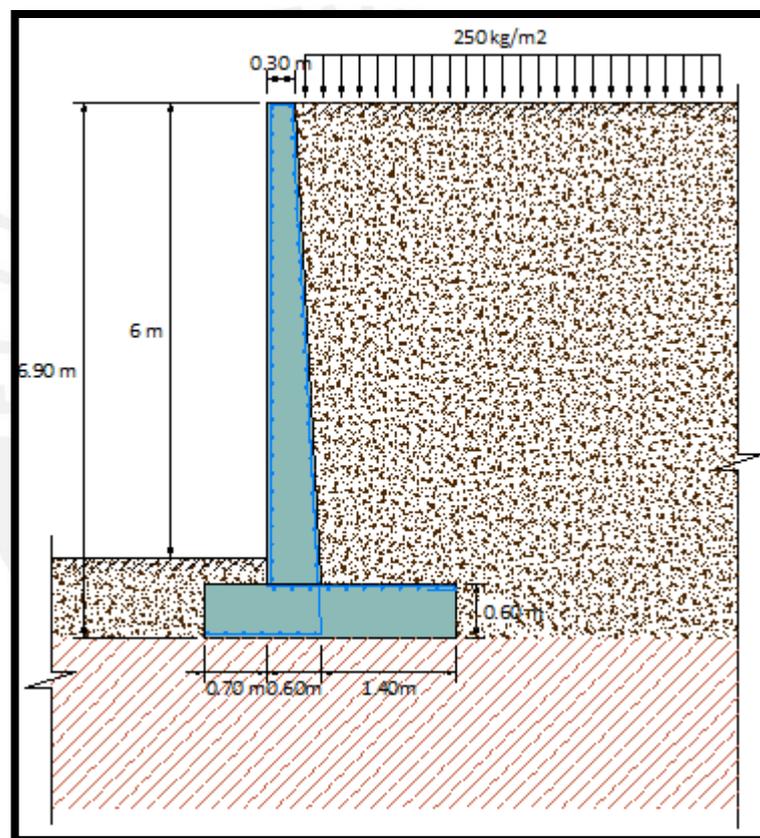
Lima, octubre de 2013

## ANEXO I

### ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realizó un análisis de sensibilidad para determinar la influencia de los “valores medios” de los parámetros geotécnicos ( $\gamma$ ,  $\phi$  y  $s_u$ ) en la estimación de los factores de seguridad al volteo al deslizamiento y por capacidad portante del terreno

El análisis de sensibilidad se realizó a un muro de contención con las siguientes características geométricas:



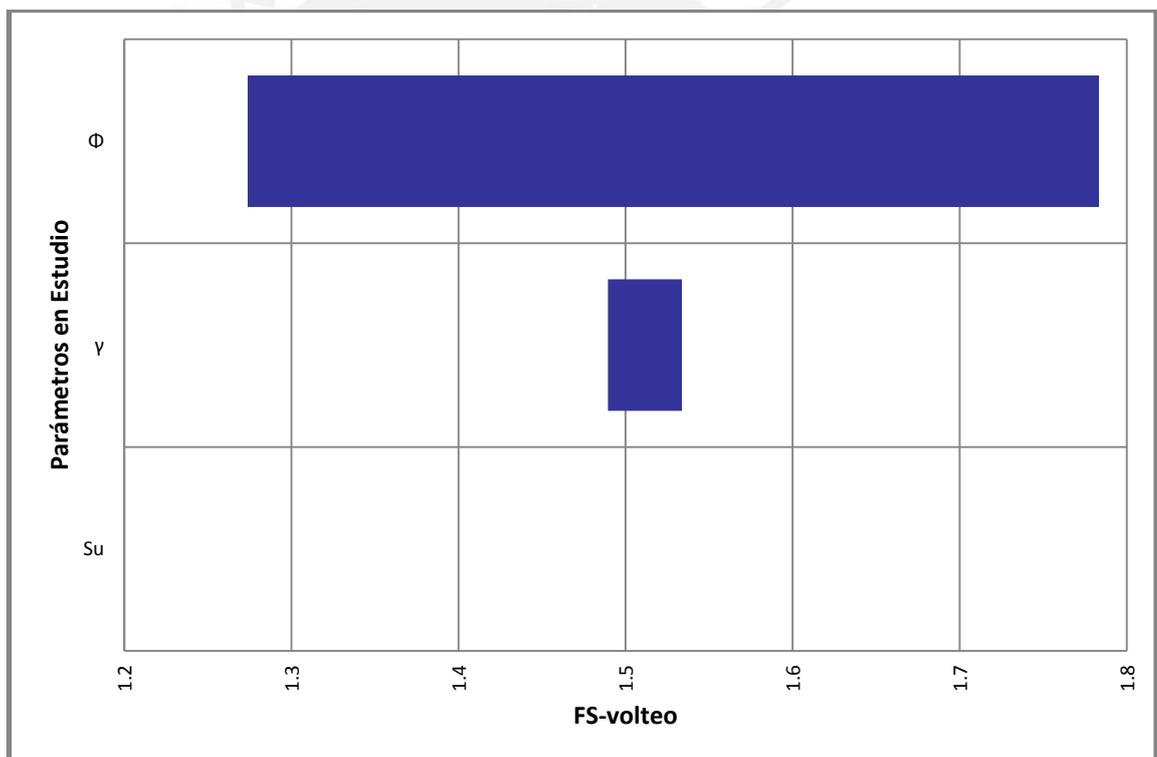
En cuanto a los parámetros geotécnicos, se tomaron los siguientes rangos de valores:

- Peso Específico ( $\gamma$ ) : [1.7 – 2.1] ton/m<sup>3</sup>
- Ángulo de Fricción Interna ( $\phi$ ) : [30 – 38] °
- Cohesión ( $s_u$ ) : [10 – 30] ton/m<sup>2</sup>

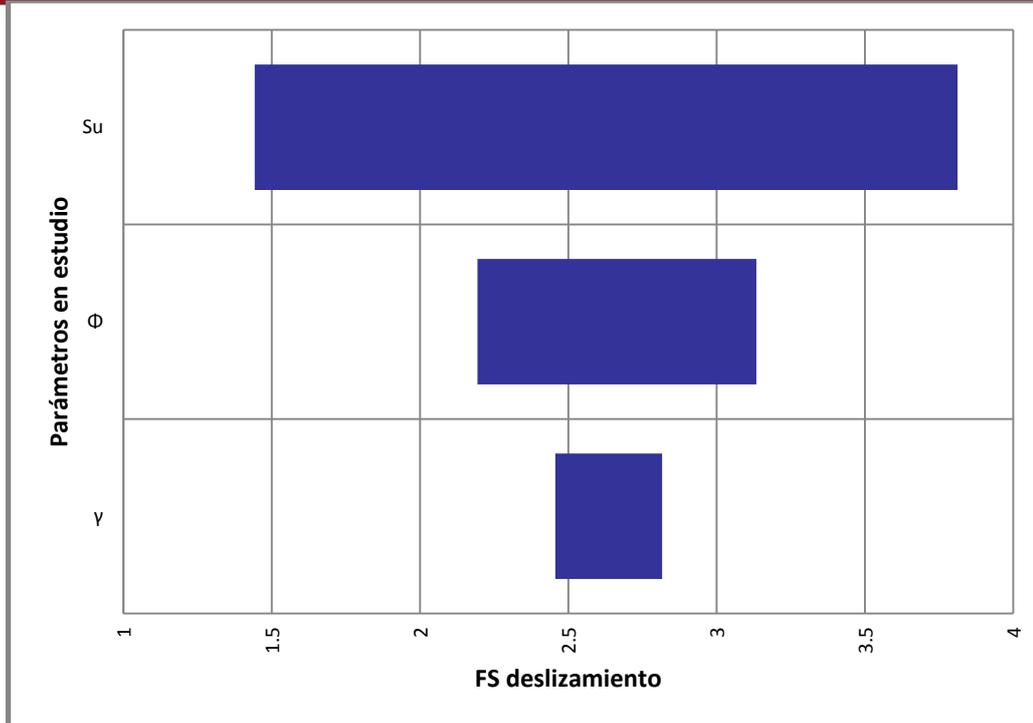
Para realizar el análisis de sensibilidad, se tomó como metodología realizar múltiples verificaciones determinísticas de la estabilidad del muro de contención, variando los valores de cada rango previamente especificado en percentiles de 5%, de modo que cuando un parámetro varíe, los otros dos parámetros tomen un valor constante (correspondiente al valor medio del intervalo).

En cada verificación determinística realizada se registró el valor correspondiente a los factores de seguridad en estudio, con el fin de determinar los rangos de variación de éstos, debido a la variación de los valores medios de " $\gamma$ ", " $\phi$ " y " $s_u$ " en los rangos indicados previamente.

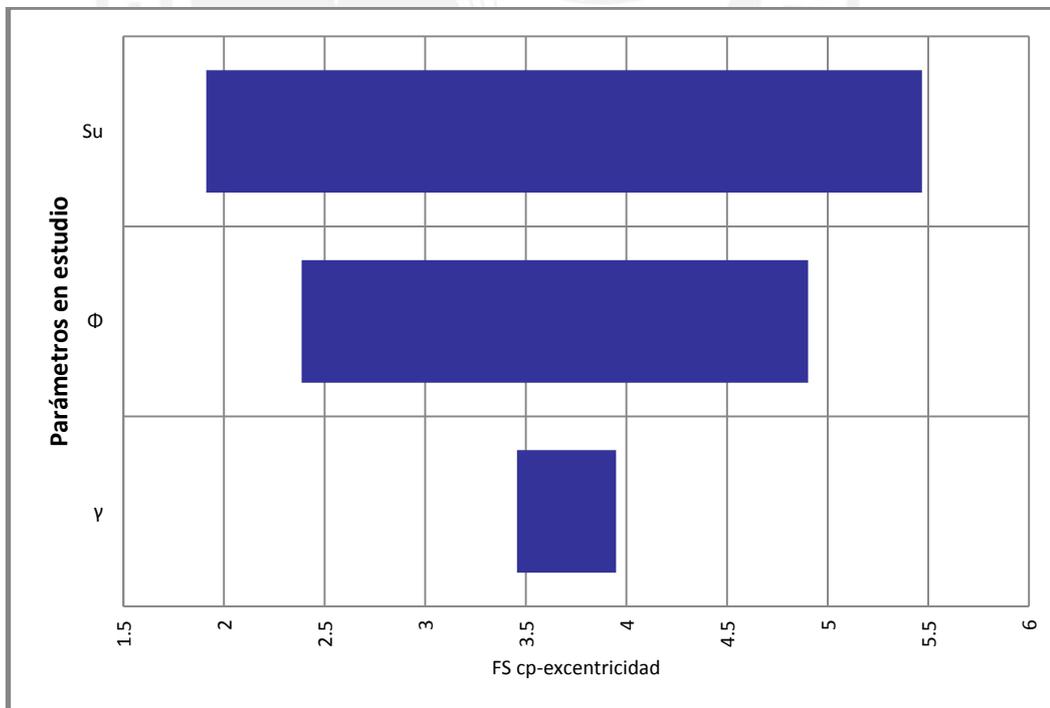
Los resultados de los análisis de sensibilidad se muestran en gráficos tipo "tornado". Estos gráficos indican el rango de valores que puede tomar un factor de seguridad, debido a la variación de los valores medios de " $\gamma$ ", " $\phi$ " y " $s_u$ ".



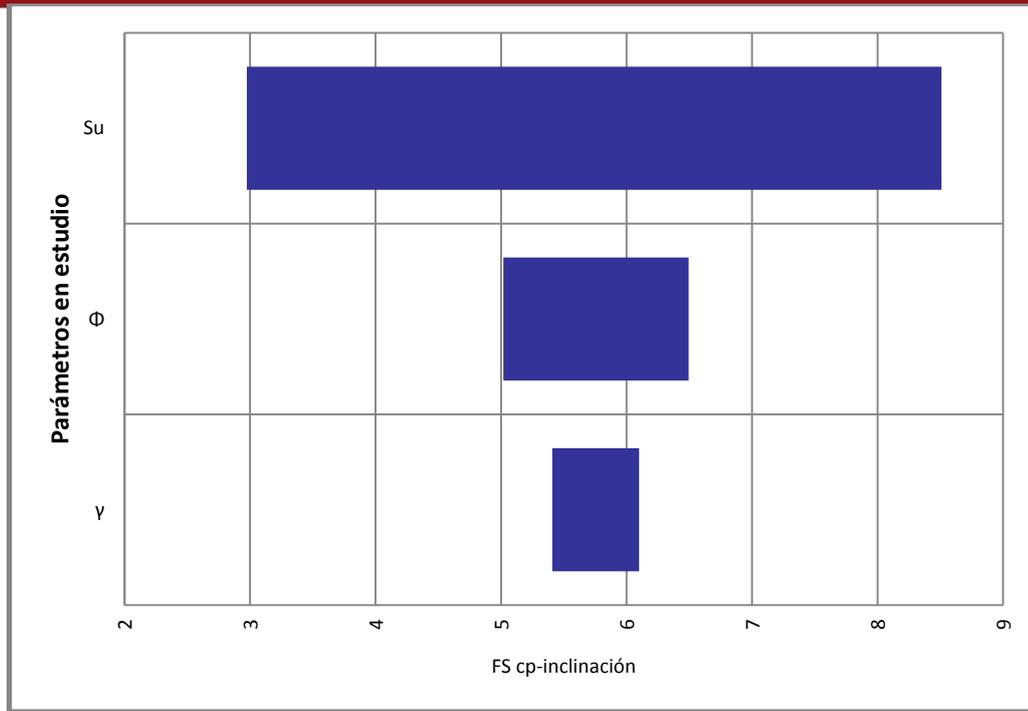
**Gráfico 1 : Sensibilidad de parámetros al Factor de Seguridad al Volteo**



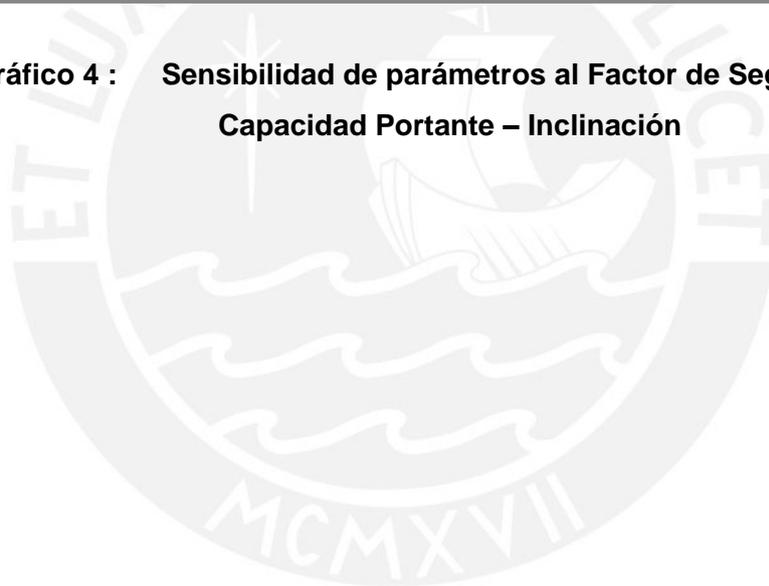
**Gráfico 2 :** Sensibilidad de parámetros al Factor de Seguridad al Desplazamiento



**Gráfico 3 :** Sensibilidad de parámetros al Factor de Seguridad por Capacidad Portante – Excentricidad



**Gráfico 4 : Sensibilidad de parámetros al Factor de Seguridad por Capacidad Portante – Inclinación**



## ANEXO II

### NOMENCLATURA Y RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES INDIVIDUALES

Para manejar la amplia base de datos obtenida en las simulaciones individuales, se generó una nomenclatura para poder diferenciar los resultados en los resúmenes.

El archivo de Excel adjunto en el CD que acompaña el documento, posee 4 hojas de trabajo, cada una para una de las alturas del muro| de contención considerada: 4m, 5m, 6m y 7m.

En la primera y segunda columna de cada hoja de trabajo encuentra la codificación del siguiente tipo:

FS volteo_i	1-gamma
-------------	---------

Donde:

- FSvolteo : Indica que es el resultado de la simulación del Factor de Seguridad al volteo del muro considerado.
- i : Indica el valor del ángulo de fricción interna con el que se trabajó el muro, teniéndose:
  - i = 30°
  - ii = 32°
  - iii = 34°
  - iv = 36°
  - v = 38°
- 1-gamma : Indica que se realizó la simulación individual, cuando el peso específico posee un coeficiente de variación del tipo 1. En el siguiente cuadro se relacionan los tipos de coeficiente de variación con los parámetros y sus coeficientes de variación.

		Parámetro		
		$\gamma$	$\Phi$	Su
TIPO	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%

Asimismo, en las columnas siguientes se muestran los resultados para los diferentes valores

de Su tomados:  $10 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$ ,  $15 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$ ,  $20 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$ ,  $25 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$  y  $30 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$



## ANEXO III

### NOMENCLATURA Y RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE GRUPO

Para manejar la amplia base de datos obtenida en las simulaciones de grupo, se generó una nomenclatura para poder diferenciar los resultados en los resúmenes.

El archivo de Excel adjunto en el CD que acompaña el documento, posee 4 hojas de trabajo, cada una para una de las alturas del muro de contención considerada: 4m, 5m, 6m y 7m.

En las cuatro primeras columnas de cada hoja de trabajo encuentra la codificación del siguiente tipo:

FS volteo_i	3	2	4
-------------	---	---	---

Donde:

- FSvolteo : Indica que es el resultado de la simulación del Factor de Seguridad al volteo del muro considerado.
- i : Indica el valor del ángulo de fricción interna con el que se trabajó el muro, teniéndose:
  - i = 30°
  - ii = 32°
  - iii = 34°
  - iv = 36°
  - v = 38°
- |   |   |   |
|---|---|---|
| 3 | 2 | 4 |
|---|---|---|

 : Indica que se realizó la simulación de grupo, cuando el peso específico posee un coeficiente de variación del tipo 3, el ángulo de fricción interna posee un coeficiente de variación del tipo 2 y la cohesión posee un coeficiente de variación del tipo 4. En el siguiente cuadro se relacionan los tipos de coeficiente de variación con los parámetros y sus coeficientes de variación.

		Parámetro		
		$\gamma$	$\Phi$	Su
TIPO	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%

Asimismo, en las columnas siguientes se muestran los resultados para los diferentes valores

de Su tomados:  $10 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$ ,  $15 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$ ,  $20 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$ ,  $25 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$  y  $30 \frac{\text{ton}}{\text{m}^2}$



## ANEXO IV

### EJEMPLO DE APLICACIÓN

#### 1 Planteamiento del Problema

Se desea diseñar un muro de contención de altura  $H = 6\text{m}$  y una sobrecarga de diseño de  $250\text{ kg/m}^2$ . De los ensayos de laboratorio y pruebas in situ, se extrajeron las siguientes propiedades del suelo

Cuadro 1.1 : Propiedades geotécnicas del suelo de cimentación

Propiedades del Suelo de Cimentación		
<b>Clasificación SUCS</b>		CL
<b>Su</b>	<b>Media</b>	15.0 ton/m <sup>2</sup>
	<b>Desviación Estándar</b>	3.0 ton/m <sup>2</sup>
	<b>Distribución a la que se ajusta</b>	Normal
<b>Ángulo de Fricción efectivo</b>		-
<b>Peso Específico</b>		1.9 ton/m <sup>3</sup>

Cuadro 1.2 : Propiedades geotécnicas del suelo retenido

Propiedades del Suelo Retenido		
<b>Clasificación SUCS</b>		SW
<b>Fi</b>	<b>Media</b>	34.00 °
	<b>Desviación Estándar</b>	2.04°
	<b>Distribución a la que se ajusta</b>	Normal
<b>Su</b>		-
<b>Gamma</b>	<b>Media</b>	1.900 ton/m <sup>3</sup>
	<b>Desviación Estándar</b>	0.095 ton/m <sup>3</sup>
	<b>Distribución a la que se ajusta</b>	Normal

Adicionalmente, de acuerdo a la importancia del muro de contención, se desea admitir una probabilidad de falla para las condiciones de diseño de 0.5%.

## 2 Determinación de los coeficientes de variación de los Factores de Seguridad

De acuerdo a las características del muro de contención de diseño, se define:

$cv_{\gamma}$	5.00%
$cv_{\phi}$	6.00%
$cv_{su}$	20.00%
$su$	15.0 (ton/m <sup>2</sup> )
$\phi$	34.00 (°)
$H$	6 (m)

De acuerdo a la metodología planteada en el trabajo de tesis, para estimar los coeficientes de variación, se deben estimar primeramente los coeficientes de variación correspondientes a las simulaciones individuales, los que servirán como parámetros de ingreso para estimar los coeficientes de variación de los factores de seguridad (correspondientes a las simulaciones de grupo). En los siguientes acápites se estimarán los coeficientes de variación de los factores de seguridad, tomando en cuenta las expresiones planteadas.

### 2.1 Coeficiente de variación del Factor de Seguridad al Volteo.

#### 2.1.1 Coeficientes de variación del Factor de Seguridad al Volteo, correspondientes a simulaciones individuales

De acuerdo a la metodología planteada, se tiene:

##### 2.1.1.1 Estimación de “ $cv_{v\gamma}$ ”

Se tiene:

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

$$cv_{v\gamma} = 0.914\%$$

### 2.1.1.2 Estimación de “ $cv_{v\phi}$ ”

Se tiene:

$$cv_{v\phi} = 10^{-2} * (-0.22 * H^2 + 3.18 * H + 21.59) * e^{(0.03 * H^2 - 0.44 * H + 5.91) * 10^{-2} * \phi} * cv_{\phi}$$

$$cv_{v\phi} = 8.62\%$$

### 2.1.2 Coeficiente de variación del Factor de Seguridad al Volteo

Se tiene:

$$cv_v = 0.123 \cdot cv_{v\gamma} + 0.992 \cdot cv_{v\phi}$$

$$cv_v = 8.67\%$$

## 2.2 Coeficiente de variación del Factor de Seguridad al Deslizamiento.

### 2.2.1 Coeficiente de variación del Factor de Seguridad al Deslizamiento, correspondientes a simulaciones individuales

De acuerdo a la metodología planteada, se tiene:

#### 2.2.1.1 Estimación de “ $cv_{d\gamma}$ ”

Se tiene:

$$cv_{d\gamma} = 7.56 \cdot 10^{-2} - 6.29 \cdot 10^{-4} \cdot \phi + 4.68 \cdot 10^{-4} \cdot Su + 2.10 \cdot 10^{-3} \cdot H + 0.45 \cdot cv_{\gamma}$$

$$cv_{d\gamma} = 9.87\%$$

#### 2.2.1.2 Estimación de “ $cv_{d\phi}$ ”

Se tiene:

$$cv_{d\phi} = 0.1 * e^{0.073 * \phi} * cv_{\phi} + (2.354 * H - 2.222 * \phi + 121.33) * 10^{-3}$$

$$cv_{d\phi} = 13.17\%$$

#### 2.2.1.3 Estimación de “ $cv_{dsu}$ ”

Se tiene:

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

$$cv_{dsu} = 20.42\%$$

## 2.2.2 Coeficiente de variación del Factor de Seguridad al Deslizamiento.

Se tiene:

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

$$cv_d = 23.80\%$$

## 2.3 Coeficiente de variación del Factor de Seguridad por Capacidad Portante - excentricidad.

### 2.3.1 Coeficiente de variación del Factor de Seguridad por Capacidad Portante - excentricidad, correspondientes a simulaciones individuales

De acuerdo a la metodología planteada, se tiene:

#### 2.3.1.1 Estimación de “ $cv_{ce\gamma}$ ”

Se tiene:

$$cv_{ce\gamma} = -4.23 \cdot 10^{-3} - 1.26 \cdot 10^{-4} \cdot \phi + 4.62 \cdot 10^{-4} \cdot Su - 2.11 \cdot 10^{-4} \cdot H + 0.812 \cdot cv_{\gamma}$$

$$cv_{ce\gamma} = 4.01\%$$

#### 2.3.1.2 Estimación de “ $cv_{ce\phi}$ ”

Se tiene:

$$cv_{ce\phi} = -2.73 \cdot 10^{-1} + 8.50 \cdot 10^{-3} \cdot \phi + 1.03 \cdot 10^{-3} \cdot Su - 7.62 \cdot 10^{-3} \cdot H + 2.97 \cdot cv_{\phi}$$

$$cv_{ce\phi} = 16.91\%$$

#### 2.3.1.3 Estimación de “ $cv_{cesu}$ ”

Se tiene:

$$cv_{cesu} = 4.03 \cdot 10^{-3} + 2.76 \cdot 10^{-4} \cdot Su + 0.918 \cdot cv_{su}$$

$$cv_{cesu} = 19.32\%$$

### 2.3.2 Coeficiente de variación del Factor de Seguridad por Capacidad Portante - excentricidad.

Se tiene:

$$cv_{ce} = 0.265 \cdot cv_{ce\gamma} + 0.596 \cdot cv_{ce\varphi} + 0.818 \cdot cv_{cesu}$$

$$cv_{ce} = 26.94\%$$

## 2.4 Coeficiente de variación del Factor de Seguridad por Capacidad Portante - inclinación.

### 2.4.1 Coeficiente de variación del Factor de Seguridad por Capacidad Portante - inclinación, correspondientes a simulaciones individuales

De acuerdo a la metodología planteada, se tiene:

#### 2.4.1.1 Estimación de “ $cv_{ci\gamma}$ ”

Se tiene:

$$cv_{ci\gamma} = 8.46 \cdot 10^{-3} - 6.84 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi + 7.77 \cdot 10^{-5} \cdot Su + 2.32 \cdot 10^{-3} \cdot H + 0.75 \cdot cv_{\gamma}$$

$$cv_{ce\gamma} = 3.82\%$$

#### 2.4.1.2 Estimación de “ $cv_{ci\varphi}$ ”

Se tiene:

$$cv_{ci\varphi} = -6.54 \cdot 10^{-2} + 2.59 \cdot 10^{-3} \cdot \varphi + 4.22 \cdot 10^{-4} \cdot Su - 5.67 \cdot 10^{-3} \cdot H + 1.12 \cdot cv_{\varphi}$$

$$cv_{ci\varphi} = 6.43\%$$

#### 2.4.1.3 Estimación de “ $cv_{cisu}$ ”

Se tiene:

$$cv_{cisu} = 2.48 \cdot 10^{-3} - 1.05 \cdot 10^{-3} \cdot H + 0.954 \cdot cv_{su}$$

$$cv_{cisu} = 18.70\%$$

2.4.2 Coeficiente de variación del Factor de Seguridad por Capacidad Portante - inclinación.

Se tiene:

$$cv_{ci} = 0.206 \cdot cv_{ci\gamma} + 0.333 \cdot cv_{ci\phi} + 0.937 \cdot cv_{cis_u}$$

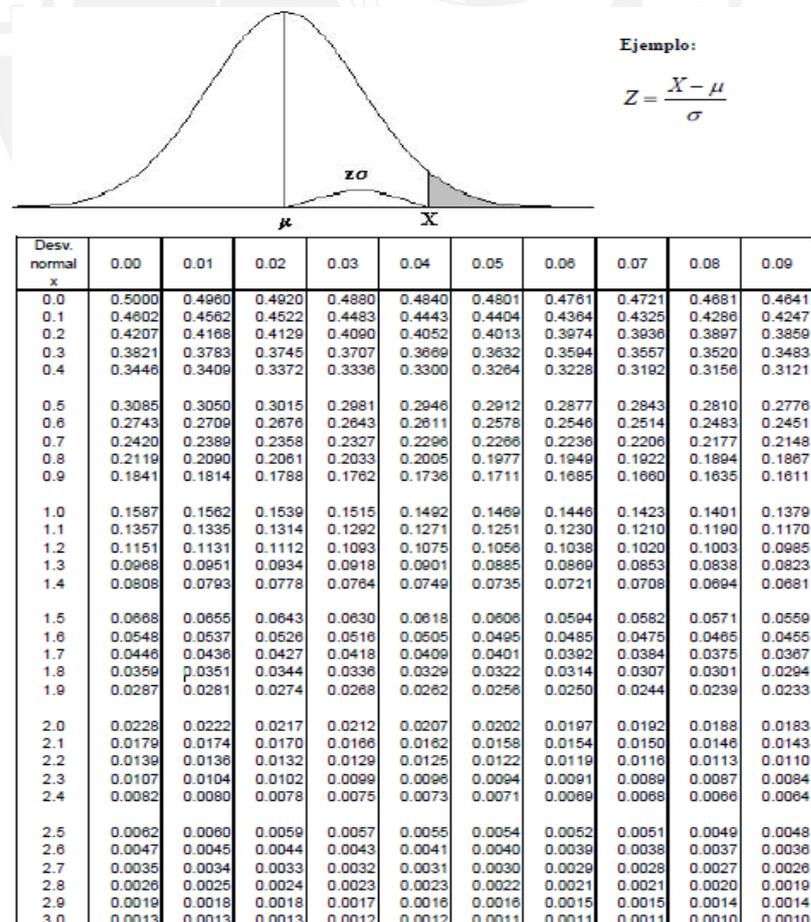
$$cv_{ci} = 20.45\%$$

3 Determinación de los Factores de Seguridad de diseño, acordes a la probabilidad de falla.

De acuerdo a los resultados de las simulaciones de grupo (para las simulaciones realizadas), la función de densidad se ajusta a una distribución normal.

Para determinar los factores de seguridad de diseño acordes a la probabilidad de falla fijada, se hará uso del cuadro 3.1.

Cuadro 3.1 : Área bajo la curva – Distribución Normal Estándar



Para las condiciones del diseño, el valor de “Z” correspondiente a un 0.5% de probabilidad de falla es “-2.58”, con lo que:

$$-2.58 = \frac{1 - FS}{FS \cdot cv_{FS}}$$

Dónde:

- $FS$  : Factor de Seguridad
- $cv_{FS}$  : Coeficiente de variación del Factor de Seguridad

### 3.1 Factor de Seguridad al Volteo

Se tiene:

$$-2.58 = \frac{1 - FS_v}{FS_v \cdot cv_v}$$

$$FS_v = 1.3$$

### 3.2 Factor de Seguridad al Deslizamiento

Se tiene:

$$-2.58 = \frac{1 - FS_d}{FS_d \cdot cv_d}$$

$$FS_d = 2.6$$

### 3.3 Factor de Seguridad por Capacidad Portante - excentricidad

Se tiene:

$$-2.58 = \frac{1 - FS_{ce}}{FS_{ce} \cdot cv_{ce}}$$

$$FS_{ce} = 3.3$$

### 3.4 Factor de Seguridad por Capacidad Portante - inclinación

Se tiene:

$$-2.58 = \frac{1 - FS_{ci}}{FS_{ci} \cdot cv_{ci}}$$

$$FS_{ci} = 2.1$$

## 4 Diseño geotécnico del muro de contención con los Factores de Seguridad hallados

De acuerdo a las consideraciones expuestas en el trabajo de tesis, en el cuadro 4.1 se muestran los valores de la base "B" del muro de contención.

**Cuadro 4.1 : Valores de base "B" para Factores de Seguridad hallados**

Criterio de Estabilidad	FS	B
Volteo	1.30	2.46 m
Deslizamiento	2.60	2.65 m
Capacidad Portante - excentricidad	3.30	2.58 m
Capacidad Portante - inclinación	2.10	0.90 m

Para que el diseño satisfaga todas las condiciones de estabilidad, se escoge el valor correspondiente a "B=2.65". Los factores de seguridad correspondientes, así como sus índices de confiabilidad se muestran en el cuadro 4.2.

Cuadro 4.2 : Factores de Seguridad del Diseño

Criterio de Estabilidad	FS	Índice de Confiabilidad ( $\beta$ )
Volteo	1.50	3.84
Deslizamiento	2.60	2.59
Capacidad Portante - excentricidad	5.70	3.06
Capacidad Portante - inclinación	3.70	3.56

## 5 Comparación de resultados de variabilidad de FS obtenidos mediante las expresiones planteadas y los obtenidos mediante un análisis probabilístico.

El cuadro 5.1, muestra la comparación entre los resultados correspondientes a los coeficientes de variación estimados mediante las expresiones planteadas en el trabajo de tesis, y aquellos correspondientes a un análisis probabilístico implementado en el software @Risk.

Criterio de Estabilidad	CV <sub>FS</sub> Expresiones planteadas	CV <sub>FS</sub> Análisis Probabilístico	Error
Volteo	8.76%	8.67%	1.0%
Deslizamiento	23.08%	23.80%	3.0%
Capacidad Portante - excentricidad	27.10%	26.94%	0.6%
Capacidad Portante - inclinación	20.98%	20.45%	2.6%

De acuerdo a lo mostrado en el cuadro 5.1, se evidencia que los valores reportados por las expresiones planteadas en el trabajo de tesis plasman un valor muy cercano al reportado por un análisis probabilístico implementado en un software.