



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TÍTULO:

**CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE FIBRAS DE HORMIGÓN
ARMADO NO-LINEAL PARA INCLUIR LOS EFECTOS DE
DEGRADACIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO-
PARTE 2**

AUTOR:

YÉPEZ CÁRDENAS, ENRIQUE SEBASTIÁN

**TRABAJO DE TIULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

ING. BARROS CABEZAS, JOSÉ ANDRÉS

Guayaquil, Ecuador

2016



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Enrique Sebastián Yépez Cárdenas**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR

Ing. José Andrés Barros Cabezas

DIRECTORA DE LA CARRERA

Ing. Stefany Esther, Alcívar Bastidas

Guayaquil, a los 29 del mes de marzo del año 2016



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Enrique Sebastián Yépez Cárdenas**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE FIBRAS DE HORMIGÓN ARMADO NO-LINEAL PARA INCLUIR LOS EFECTOS DE DEGRADACIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO- PARTE 2**, previo a la obtención del Título **de Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico, del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, 29 del mes de febrero del año 2016

EL AUTOR

Enrique Sebastián Yépez Cárdenas



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, Enrique Sebastián Yépez Cárdenas

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación **CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE FIBRAS DE HORMIGÓN ARMADO NO-LINEAL PARA INCLUIR LOS EFECTOS DE DEGRADACIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO- PARTE 2**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, 29 del mes de marzo del año
2016**

EL AUTOR:

Enrique Sebastián Yépez Cárdenas

AGRADECIMIENTO

A Dios por estar conmigo cuando lo necesito.

A mi familia por enseñarme a siempre dar lo mejor de mí.

Al Ing. Barros por su guía y su dedicación de tiempo para el desarrollo de este
trabajo.

Enrique Yépez

DEDICATORIA

A mis padres Enrique y Mónica, y a mis hermanas Belén y Andrea.

Enrique Yépez

Índice General

INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Justificación	3
1.4 Organización del documento	3
Capítulo 1.....	4
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Proceso de Calibración realizado por Haselton y otros (2007)	5
1.3 Modelo de Fibras	7
1.4 Ventajas y desventajas de cada modelo Ventajas y desventajas del modelo de Ibarra-Krawinkler- Medina	8
1.5 OpenSees.....	9
1.6 Comando Reinforcing Steel	10
1.7 Herramienta Computacional creada por el Ing. Condo	12
Capítulo 2.....	15
2.1 Primera metodología de la Calibración propuesta	15
2.2 Segunda metodología de la Calibración propuesta	18
Capítulo 3.....	24
3.1 Resultados de la Calibración	24
3.2 Gráficos de dispersión con α	34
3.3 Gráficos de dispersión con C_f	36

3.4 Gráficos de dispersión con C_d	39
Capítulo 4	42
Conclusiones	42
Recomendaciones	43
Bibliografía.....	44
Anexos.....	45

Índice de Gráficos

Fig. 1.- Curva de Resistencia Vs. Deformación (Back-bone curve) para modelos histeréticos (Ibarra, Medina, & Krawinkler, 2005).....	5
Fig. 2.-Ejemplo de proceso de calibración (Haselton y otros) (2007).....	7
Fig. 3.- Sección de columna – Modelo de Fibras (Verri, 2003)	8
Fig. 4.- Constantes de Coffin-Manson (OpenSees, 2010)	12
Fig. 5.- Herramienta Computacional de Calibración (Condo, 2015).....	14
Fig. 6.- Deformaciones máximas positivas y negativas del ensayo # 3.....	16
Fig. 7.- Gráfica histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de α bajo.	19
Fig. 8.- Gráfica histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de α medio.	19
Fig. 9.- Gráfica de histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de α alto	20
Fig. 10.- Gráfica de histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de C_f sin calibrar.....	21
Fig. 11.- Gráfica de histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de C_f calibrado	21

Fig. 12.- Gráfica de histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de C_d bajo	22
Fig. 13.- Gráfica de histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de C_d medio.	23
Fig. 14.- Gráfica de histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de C_d alto	23
Fig. 15.- Gráfica de dispersión con rho	34
Fig. 16.- Gráfica de dispersión con rho_sh	34
Fig. 17.- Gráfica de dispersión con db/s	34
Fig. 18.-Gráfica de dispersión con $(P/Ag)/f'c$	35
Fig. 19.- Gráfica de dispersión con $f'c$	35
Fig. 20.-Gráfica de dispersión con f_y	35
Fig. 21.- Gráfica de dispersión con Ls/h	36
Fig. 22.- Gráfica de dispersión con rho	36
Fig. 23.-Gráfica de dispersión con rho_sh	37
Fig. 24.-Gráfica de dispersión con db/s	37
Fig. 25.- Gráfica de dispersión con $(P/Ag)/f'c$	37
Fig. 26.-Gráfica de dispersión con $f'c$	38
Fig. 27.- Gráfica de dispersión con f_y	38
Fig. 28.- Gráfica de dispersión con Ls/h	38
Fig. 29.-Gráfica de dispersión con rho	39
Fig. 30 .-Gráfica de dispersión con rho_sh	39
Fig. 31.-Gráfica de dispersión con db/s	39
Fig. 32.-Gráfica de dispersión con $(P/Ag)/f'c$	40
Fig. 33.-Gráfica de dispersión con $f'c$	40

Fig. 34.-Gráfica de dispersión con f_y	40
Fig. 35 .-Gráfica de dispersión con L_s/h	41

Índice de Tablas

Tabla 1.- Tabla de inercia transformada.	35
Tabla 2.- Tabla de deformación máxima.....	36
Tabla 3.- Tabla de rigidez.	36
Tabla 4.- Tabla de Deformaciones Máximas con sus respectivas Fuerzas y $\Delta\epsilon_p$	37
Tabla 5.- Tabla de α , C_f y Daño.....	37
Tabla 6.- Tabla de C_d , ϕ_{sr} y K_1	18
Tabla 7.- Tabla de Comentarios de la calibración de los 88 ensayos.....	38
Tabla 8.- Tabla de resumen de comentarios.....	25
Tabla 9.- Tabla de resumen de valores α , C_f , C_d , ω , γ y #Pasos....	38
Tabla 10.- Tabla de Correlaciones de los ensayos para δ_b/s y ρ	28
Tabla 11. Tabla de Correlaciones de los ensayos para δ_b/s y ρ	39
Tabla 12. Tabla de Correlaciones de los ensayos para ρ_{sh} y L_s/h	30
Tabla 13. Tabla de Correlaciones de los ensayos para ρ_{sh} y L_s/h	31
Tabla 14.-Tabla de Correlaciones de los ensayos para f_y , f'_c , y $(P^*Ag)/f'_c$	32
Tabla 15. Tabla de Correlaciones de los ensayos para f_y , f'_c , y $(P^*Ag)/f'_c$	33

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1	11
Ecuación 2	11
Ecuación 3	11
Ecuación 4	11
Ecuación 5	11
Ecuación 6	16
Ecuación 7	16

RESUMEN (ABSTRACT)

En el siguiente trabajo de titulación se plantea el desarrollo de una Metodología para calibrar los parámetros de degradación y resistencia del acero de refuerzo longitudinal de un elemento viga-columna, el cual está sometido a cargas cíclicas. Los parámetros que se calibraron corresponden a los coeficientes de Coffin-Mason establecidos en el Software Opensees en el comando Reinforcing Steel. Se calibra un modelo de fibras de hormigón armado no-lineal, de manera que se pueda incluir los efectos de degradación y de la interacción de cargas de flexión con carga axial. Este trabajo corresponde a la segunda parte de una investigación que tiene la finalidad de desarrollar ecuaciones que definan los parámetros de degradación, para poder modelar cualquier tipo de elemento viga-columna, en función de la geometría, armadura y resistencia de los materiales. Se define esta metodología para la calibración de los modelos constitutivos, realizándose la calibración de 88 ensayos, mediante la utilización de la herramienta computacional creada por el Ing. Alejandro Condo durante el desarrollo de la primera parte de la investigación.

Palabras Claves: *Calibración, Coeficientes de Coffin-Mason, Opensees Reinforcing Steel, degradación, carga cíclica*

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

Cuando un sismo ocurre puede generar daños a una estructura que no tenga un diseño sismo-resistente o que el diseño sismo-resistente que tenga no sea el adecuado. Por ese motivo el diseño estructural debe estimar correctamente las fuerzas sísmicas y definir las zonas controladas de daño, para que se disipe la energía minimizando el peligro de los ocupantes de las edificaciones.

“El procedimiento de diseño lineal que se encuentra en los códigos modernos de construcción está basado en el concepto de convertir el complicado comportamiento dinámico no lineal de una estructura bajo cargas sísmicas en un problema lineal equivalente”. (FEMA/P695, 2009)

Para realizar este procedimiento lineal se define de antemano el sistema estructural, el tipo de análisis que se va a emplear y los factores de desempeño sísmico, los cuales son: el coeficiente de modificación de repuesta (R), el factor de sobre-resistencia del sistema (Ω_o), y el factor de amplificación de desplazamientos (C_d).

Los factores de desempeño sísmico son usados para estimar fuerzas y deformaciones en sistemas estructurales que son diseñados usando métodos de análisis lineales, pero responden en un rango no lineal. Estos valores son críticos en estimación de la fuerza sísmica.

“La norma FEMA P-695 es una metodología que sirve para la cuantificación de los factores de diseño sísmico para nuevos sistemas constructivos, la cual toma en consideración el tipo de material de construcción, configuración de la

estructura, forma de disipación de energía y el rango de aplicación de la tipología de la estructura (geometría y niveles de carga)” (FEMA/P695, 2009).

El objetivo de la norma FEMA P-695 es desarrollar un procedimiento consistente y racional para la correcta estimación de los factores de desempeño sísmico (R , Ω_o , C_d), de esta manera lograr diseños seguros ante posibles eventos sísmicos. La inclusión de los términos de degradación en los modelos constitutivos es esencial para la determinación de la probabilidad de colapso de las estructuras. (Haselton, y otros, 2008). Los modelos actuales pueden incluir términos de degradación, pero por ahora no pueden incluir de manera directa la interacción de la flexión con la carga axial.

La intención del presente trabajo de titulación es calibrar un modelo de fibras de hormigón armado no-lineal, de manera que se puedan incluir los efectos de degradación y de la interacción de cargas de flexión con carga axial. Este trabajo corresponde a la segunda parte de una investigación que tiene la finalidad de desarrollar ecuaciones que definan los parámetros de degradación, para poder modelar cualquier tipo de elemento viga-columna de hormigón armado, en función de la geometría, armadura y resistencia de los materiales. En el presente trabajo se define una metodología para la calibración de los modelos constitutivos, realizándose la calibración de 88 ensayos, mediante la utilización de la herramienta computacional creada por el Ing. Alejandro Condo durante el desarrollo de la primera parte de la investigación.

1.2 Objetivo

El objetivo principal es calibrar 88 ensayos utilizando la herramienta computacional creada por el Ing. Condo y revisar de manera general las correlaciones de los resultados frente a las diferentes variables, las cuales son: geometría de la sección, geometría de la armadura y resistencia de materiales.

1.3 Justificación

El fin de realizar esta calibración es de tener la capacidad de aplicar la metodología FEMA P-695, con los tipos de análisis que este documento exige para estructuras con elementos tipo viga-columna de hormigón armado.

1.4 Organización del documento

1.- Capítulo 1

En este capítulo se encuentra los antecedentes del análisis no-lineal y su importancia, además los primeros pasos de las calibraciones realizadas para este tipo de análisis. También se habla de los modelos matemáticos usados, los cuales son: el modelo de fibras y el de Ibarra-Krawinkler-Medina. Y por último encontrará detalles del software Opensees, del comando Reinforcing y de la herramienta computacional creada por el Ing. Condo.

2.- Capítulo 2

En este capítulo se encuentra la primera y la segunda metodología de la calibración propuesta.

3.- Capítulo 3

En este capítulo se encuentra los resultados y comentarios de la Calibración, como también gráficos de dispersión con α , Cf y Cd.

Capítulo 1

1.1 Antecedentes

La primera generación de disposiciones sobre evaluación de estructuras basadas en el desempeño, como FEMA 273, 356 (ASCE 1997; ASCE 2000b) y ATC 40 (ATC 1996), proporcionan un excelente primer paso hacia aproximaciones codificadas que abarcan el análisis no-lineal, para estimar el desempeño de un sistema estructural y que se puedan articular mediciones de los parámetros de desempeño desde la aparición de daños hasta el colapso de la estructura. (Haselton et al., 2007)

El proyecto FEMA 273/356 (FEMA 1997; ASCE 2000) fue muy importante por ser uno de los primeros, codificando los modelos no-lineales de degradación y los procedimientos con el fin de evaluar específicamente el colapso estructural.

Luego se creó la norma FEMA P-695 (FEMA 2009) que es una metodología que cuantifica los factores de diseño sísmico para nuevos sistemas constructivos.

Haselton et al. (2007), durante la construcción del documento FEMA P695, calibraron 255 ensayos de columnas de hormigón armado usando el modelo desarrollado por Ibarra, Medina and Krawinkler (2005, 2003), que estaba integrado en el programa de análisis estructural OpenSees. Si bien este modelo solamente considera el comportamiento a flexión de los elementos y, por lo tanto, desprecia la interacción de la carga axial con la flexión, lo hicieron así porque no existía un modelo del material de acero implementado en OpenSees que sea capaz de incluir la degradación por carga cíclica.

Ibarra - Krawinkler - Medina, proponen modelos matemáticos con ciclos de histéresis, que tienen la capacidad de incluir la degradación cíclica de la resistencia y rigidez de un elemento. Este tipo de modelos utilizan la curva de

Resistencia Vs. Deformación (Backbone curve), para poder definir el comportamiento monótonico de las deformaciones. Si no existe degradación, esta curva define el esfuerzo de fluencia, esfuerzo último y el esfuerzo de ruptura (Ibarra, Medina, & Krawinkler, 2005).

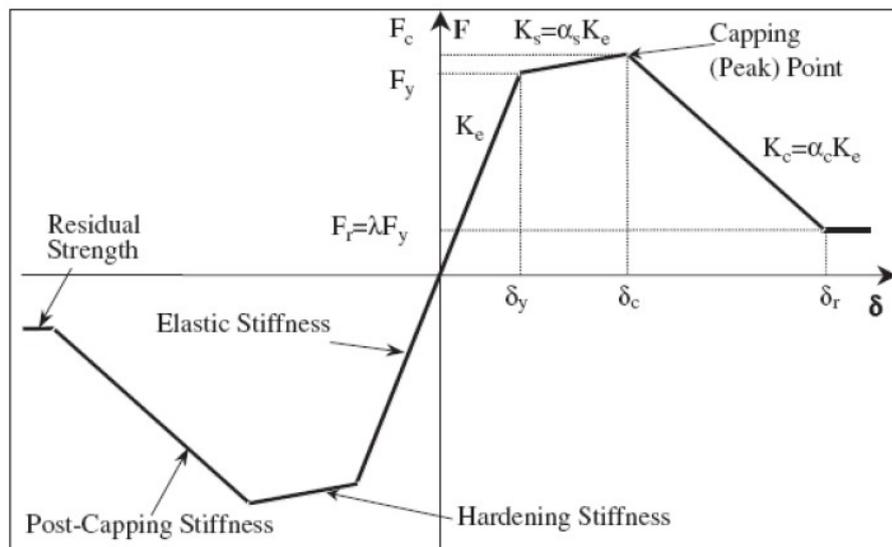


Fig. 1.- Curva de Resistencia Vs. Deformación (Back-bone curve) para modelos histeréticos (Ibarra, Medina, & Krawinkler, 2005)

1.2 Proceso de Calibración realizado por Haselton y otros (2007)

“La calibración realizada por Haselton(2007) fue conducida en una manera sistemática. Se realizaron esfuerzos para estandarizar el proceso de calibración para poder reducir los posibles errores y las inconsistencias. A continuación se detallan los pasos de la calibración.

1. Los datos fueron procesados para tener un comportamiento consistente con los efectos P-delta, para que la calibración no fuera afectada por las diferentes configuraciones de los aceros.

2. La fuerza cortante de fluencia fue estimada visualmente de los ensayos, para calibrar con precisión la degradación de un ciclo, fue necesario calibrar por separado la dirección de la fuerza cortante de fluencia, la parte positiva de la negativa.

3. El tercer paso fue estimar el desplazamiento de la “fluencia”, definido como el punto en donde la varilla empieza a fluir o el punto cuando el concreto comienza a agrietarse significativamente. En cualquiera de los casos el desplazamiento fue calibrado para el punto donde se observaba que la rigidez lateral de la columna cambiaba significativamente.

4. En el cuarto paso se observaron más de cerca los cambios de rigidez en la zona de “pre-fluencia”. Del resultado de muchos experimentos se ha podido observar que la rigidez a menudo cambia significativamente cerca del 40% de la fuerza de fluencia.

5. En el quinto paso se calibró el incremento de fuerza, desde el punto de fluencia hasta el punto de fuerza última. Esto se realizó mediante la calibración visual de la rigidez en la zona de “pre-fluencia” de los ensayos.

6. En el paso seis se calibra la capacidad de disipación de energía entre cada ciclo por medio del factor “ λ ”. Para calibrar “ λ ” se hizo coincidir la degradación promedio de toda la historia de desplazamientos pero haciendo énfasis en ajustar el rango de degradación de los últimos ciclos, que son los más dañinos.

7. El último paso de la calibración es un proceso que involucra el punto de fuerza última y la capacidad de deformación después de sucedida la fuerza última. La calibración del punto de fuerza última fue un componente crítico en el proceso de calibración ya que si se observaba una clara rigidez negativa en el ensayo causando que la resistencia disminuya en un ciclo se la calibraba usando la rigidez negativa. Pero si esta disminución de resistencia ocurría en

dos ciclos no se usaba una rigidez negativa porque daba resultados que no representan la realidad.” Traducido de Haselton,(2007).

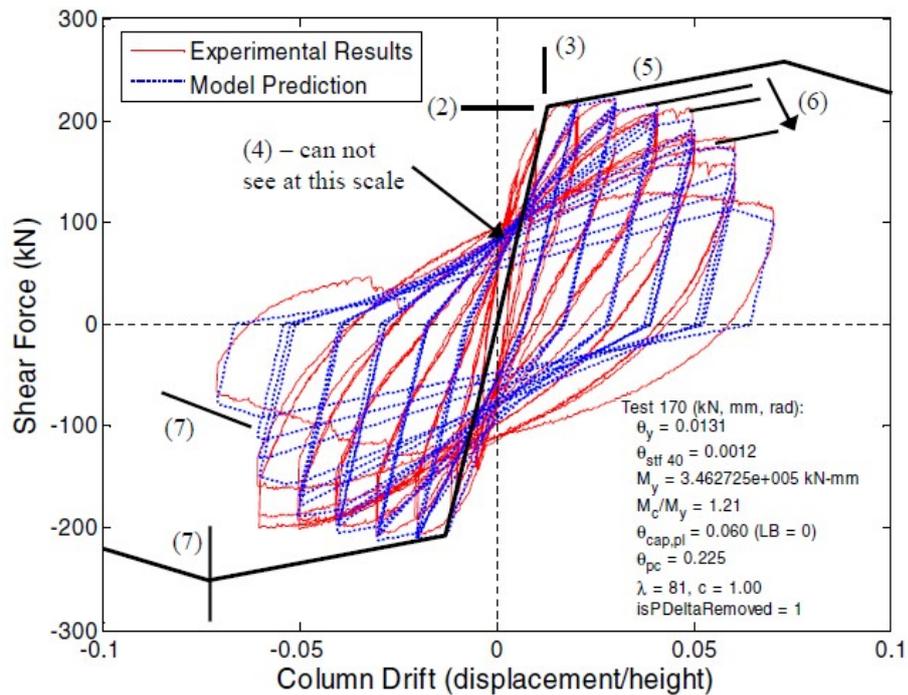


Fig. 2.2 Example of calibration procedure; calibration of RC beam-column model to experimental test by Saatcioglu and Grira⁷, specimen BG-6.

Fig. 2.-Ejemplo de proceso de calibración (Haselton y otros) (2007)

1.3 Modelo de Fibras

Un modelo de fibras se utiliza para estimar numéricamente el comportamiento de secciones con materiales no-lineales, en el cual se considera la discretización de la sección transversal en un número finito de fibras (elementos uniaxiales) con características geométricas y mecánicas equivalentes al

material de la sección diferencial analizada. Cada fibra de la sección tendrá asociada una ecuación constitutiva según corresponda (Verri, 2003).

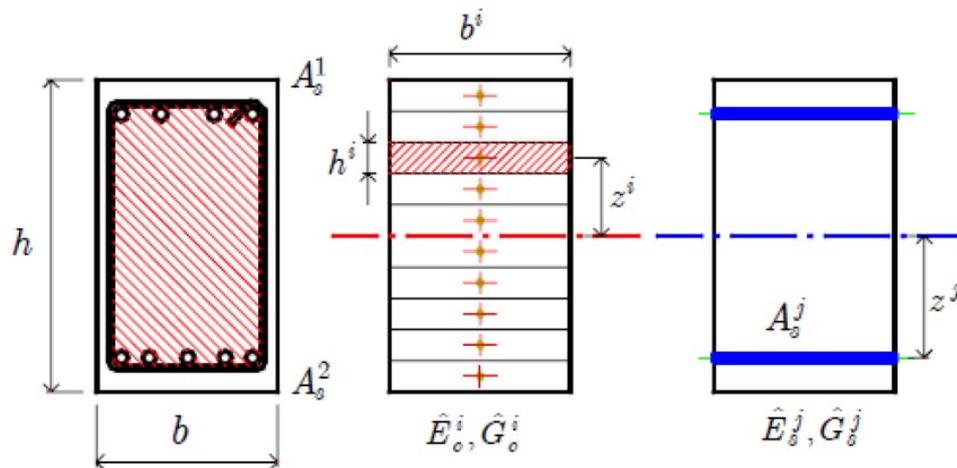


Fig.16. Discretización de una sección de hormigón armado mediante fibras. a) Núcleo de la sección confinada por estribos; b) Fibras correspondientes al hormigón confinado; c) fibras correspondientes al acero

Fig. 3.- Sección de columna – Modelo de Fibras (Verri, 2003)

“1.4 Ventajas y desventajas de cada modelo Ventajas y desventajas del modelo de Ibarra-Krawinkler- Medina

Ventajas

- Con este tipo de modelo se incluye la degradación de la rigidez y resistencia de un elemento.
- Estos modelos incorporan el deterioro cíclico controlado por la disipación de energía.
- Este tipo de modelos incorporan los efectos del deterioro por la respuesta sísmica.

Desventajas

- Este modelo no considera de manera directa la interacción de la flexión con la carga axial.
- Es un modelo de plasticidad concentrada, por lo que se pierde la posibilidad de encontrar formación de rótulas plásticas fuera de las zonas extremas de los pórticos.

Ventajas y desventajas del modelo de Fibras

Ventajas

- Analiza y determina el comportamiento de cada fibra, tomando en cuenta la interacción de la carga axial con la flexión de manera directa.
- Se puede considerar el efecto del confinamiento en las secciones de hormigón armado, con una calibración adecuada de las constitutivas. Lo mismo aplica para el comportamiento a compresión de las varillas longitudinales, en lo referente al pandeo.

Desventajas

- Se considera adherencia perfecta entre las fibras, es decir no se consideran los deslizamientos entre fibras (es decir, no incluyen la deformación por cortante).
- Las constitutivas que se han propuesto todavía no consideran que la sección va a estar sujeta a degradación debido a los ciclos de carga y descarga.” (Condo, 2015)

1.5 OpenSees

“Es un software abierto desarrollado por El Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico (PEER) que permite la creación de elementos finitos para la aplicación en los campos de la ingeniería como estructuras y geotecnia.

Permite simular el desempeño de un sistema estructural o geotécnico sujeto a un sismo.

Primeramente era usado para la ingeniería sísmica pero también ha sido utilizado para estudiar los efectos del viento, fuego y olas en estructuras.” (OpenSees, 2010)

1.6 Comando Reinforcing Steel

Este comando de OpenSees se utiliza para crear un material uniaxial para el acero de refuerzo longitudinal. Usualmente este tipo de material se usa cuando existe una sección de fibras de hormigón armado (OpenSees, 2010).

Este comando es ideal para la simulación del comportamiento de una varilla longitudinal ya que el modelo incluye la deformación del elemento hasta la fluencia, luego cómo fluye hasta que llegar al endurecimiento y finalmente hasta que alcanza la ruptura. Incluye también los efectos de degradación cíclica, tanto de rigidez como de resistencia.

Tenemos tres parámetros que controlan este comando, los cuales son α , C_f y C_d . Estos parámetros son las constantes de Coffin-Manson de fatiga y reducción de resistencia.

C_f : Es una constante de ductilidad, usada para ajustar el número de ciclos para la falla. Su valor varía entre 0 y 0.8

- Un valor alto de C_f va a resultar en menor daño por cada ciclo, es decir, se requiere un mayor número de ciclos de carga para conseguir la falla del material.

C_d : Es la constante de reducción de resistencia. Su valor varía entre 0 y 1.

- Un valor alto de C_d va a resultar en una baja reducción de resistencia por cada ciclo.

α : Es una constante de daño usada para relacionar el daño de una deformación, a un daño equivalente en otra deformación. Su valor varía entre 0.1 y 0.9.

A continuación vamos a mostrar las ecuaciones que interrelacionan los coeficientes de Coffin-Manson (α , C_f y C_d). Estas ecuaciones fueron obtenidas del Software Opensees en el comando Reinforcing Steel.

$$\varepsilon_p = \varepsilon_t - \frac{\sigma_t}{E_s}$$

Ecuación # 1

$$D = \sum \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{C_f} \right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

Ecuación # 2

$$\phi_{SR} = K_1 D$$

Ecuación # 3

$$\phi_{SR} = \sum \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{C_d} \right)^{\frac{1}{\alpha}}$$

Ecuación # 4

$$C_d = \frac{C_f}{K_1^\alpha}$$

Ecuación # 5

C_f y α son factores usados para relacionar el número de medios ciclos para la fractura y la deformación plástica de la mitad del ciclo, también son usados para definir un daño acumulativo D, que es 0 cuando no tiene daño y 1 cuando se ha producido la fractura.

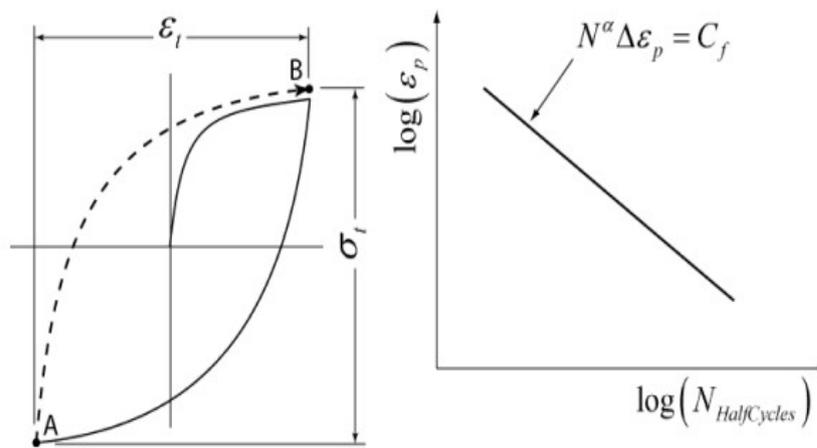


Figure 6a: Coffin-Manson Constants Figure 6b: Half Cycle Terms Defined

Fig. 4.- Constantes de Coffin-Manson (OpenSees, 2010)

1.7 Herramienta Computacional creada por el Ing. Condo

Para realizar el programa de calibración se utilizó el software OpenSees junto con el Software Matlab. El software Matlab es un programa que funciona mediante la creación de scripts, este programa se utilizó para automatizar la creación de modelos y crear una interfaz gráfica que sea amigable para el usuario. (Condo, 2015).

Los datos característicos de cada ensayo fueron obtenidos de la base de datos de PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) en esta página se encontraron 301 ensayos correspondientes a columnas rectangulares. Se utilizó una base de datos de 177 ensayos, la misma que contiene la información de cada uno de los ensayos: cargas impuestas, geometría, detalle del refuerzo longitudinal, detalle del refuerzo transversal, tipo de ensayo; con esta información se procedió a crear los script "base" para el análisis de cada tipo de ensayo, en que se definen las condiciones de apoyo, los materiales, cargas y el tipo de análisis a realizar.

Se creó un modelo de una columna de hormigón armado con diferentes condiciones de apoyo. En la base de datos se encuentran 113 ensayos en cantiliver y 64 ensayos con doblemente empotrados. Los modelos tienen algunas limitaciones, las mismas que se resumen a continuación.

- El modelo tiene dos dimensiones y se consideran 3 grados de libertad en cada nudo.
- La columna está conformada por hormigón armado, y tiene una sección rectangular.
- Las columnas fueron modeladas como elementos tipo “frame” debido a que las dimensiones de la sección transversal son mucho menores a su longitud.
- Los modelos no consideran el peso propio del elemento.
- Los materiales definidos consideran los efectos de degradación por carga cíclica y la interacción de carga axial y flexión.

Se generó una codificación que facilita y automatiza la generación y calibración de modelos mediante el ingreso de 5 parámetros fundamentales que son:

1. # de Ensayo: Se deberá ingresar el número del ensayo a calibrar. El software matlab buscará en la base de datos todos los parámetros correspondientes del ensayo ingresado.
2. Coeficientes de Coffin-Manson: Los mismos ya definidos en 1.6 Comando Reinforcing Steel.
 - a. Ductilidad (C_f)
 - b. Coeficiente de daño (α)
 - c. Coeficiente de reducción de resistencia (C_d)
3. Omega: Es un factor que deberá ser ingresado con un valor diferente de 1 para modificar el coeficiente de mayoración de resistencia del hormigón.

4. Gamma: Es un factor que deberá ser ingresado con un valor diferente de 1 para modificar la resistencia a fluencia del acero de refuerzo longitudinal.
5. Número de paso: Indica el número de sub-incrementos de desplazamientos en que se van a dividir los incrementos de desplazamientos que reportan los ensayos.

The screenshot shows a software window titled "CALIBRACION DEL ACERO DE REFUERZO". The interface is organized into several sections:

- # de Ensayo:** A text input field.
- Información:** A section containing:
 - Autor:** A text input field.
 - Tipo de ensayo:** A text input field.
- Geometria:** A section containing:
 - Altura=** [input] cm
 - Base=** [input] cm
 - Longitud=** [input] cm
- Parametros a calibrar:** A section containing:
 - alpha=** [input]
 - Cf=** [input]
 - Cd=** [input]
 - omega** [input]
 - gamma** [input]
- # de Paso:** A text input field.
- EJECUTAR:** A button.
- Graph:** A coordinate system with both x and y axes ranging from 0 to 1, currently empty.

Fig. 5.- Herramienta Computacional de Calibración (Condo, 2015)

Capítulo 2

Metodología para la calibración

2.1 Primera metodología de la Calibración propuesta

El primer paso consiste en la calibración de las constantes omega, gamma. Se la realiza visualizando la gráfica de histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total, tratando de que la fuerza cortante en el primer ciclo del ensayo coincida con la fuerza cortante en el primer ciclo del análisis. Estas constantes solo afectan el tamaño de las ordenadas de la gráfica.

De manera simultánea se busca que el “número de pasos” asegure la convergencia del modelo en toda la historia de deformaciones del ensayo.

El siguiente paso es calibrar son α , C_f y C_d coeficientes que afectan la forma de la gráfica y están interrelacionados con las ecuaciones mostradas en el capítulo anterior. A continuación se describe la metodología usada:

1. Se tiene que encontrar la inercia transformada, esto quiere decir que se transformó la inercia de las varillas de acero longitudinal a una inercia equivalente de concreto, con esto se tienen resultados más reales. Se usó la siguiente tabla para realizar este paso.

Tabla 1.- Tabla de inercia transformada.

Ensayos	Config.	Ec (Kg/cm2)	Es (Kg/cm2)	n	lc (cm4)	H(cm)	L(cm)	Total # Bars	# Intermediate Bars PER	# Intermediate Bars PA	Clear Cover (cm)	Diameter (cm)
1	C	272766.86	2100000	7.70	762552.08	55	165	12	2	2	4	2
2	C	272766.86	2100000	7.70	762552.08	55	165	12	2	2	4	2
3	C	273192.72	2100000	7.69	762552.08	55	165	12	2	2	4	2
4	C	273192.72	2100000	7.69	762552.08	55	165	12	2	2	4	2
5	C	250087.94	2100000	8.40	554583.33	60	178.4	10	1	2	2.4	2.4
6	DC	218851.85	2100000	9.60	32552.08	25	37.5	6	1	0	1.2	0.95

Tabla 1.- Tabla de inercia transformada.

#AS1	#AS2	#AS3	#AS4	#AS5	#AS6	AS1	AS2	AS3	AS4	AS5	AS6	D1	D2	D3	D4	D5	D6	I trans (cm4)
4	2	2	4	0	0	12.5664	6.2832	6.2832	12.5664	0.0000	0.0000	22.5000	11.2500	11.2500	22.5000	0.0000	0.0000	858439.0950
4	2	2	4	0	0	12.5664	6.2832	6.2832	12.5664	0.0000	0.0000	22.5000	11.2500	11.2500	22.5000	0.0000	0.0000	858439.0950
4	2	2	4	0	0	12.5664	6.2832	6.2832	12.5664	0.0000	0.0000	22.5000	11.2500	11.2500	22.5000	0.0000	0.0000	858267.3086
4	2	2	4	0	0	12.5664	6.2832	6.2832	12.5664	0.0000	0.0000	22.5000	11.2500	11.2500	22.5000	0.0000	0.0000	858267.3086
4	2	4	0	0	0	18.0956	9.0478	18.0956	0.0000	0.0000	0.0000	26.4000	0.0000	26.4000	0.0000	0.0000	0.0000	741164.8159
2	2	2	0	0	0	1.4176	1.4176	1.4176	0.0000	0.0000	0.0000	10.8250	0.0000	10.8250	0.0000	0.0000	0.0000	35407.8694

2. Se impone una fuerza unitaria y se calcula la deformación máxima. Para

el caso de cantiléver se usó: $\frac{PL^3}{3EI}$ (ecuación # 6) y para el caso de

doblemente empotrada se usó: $\frac{PL^3}{12EI}$ (ecuación # 7).

Tabla 2.- Tabla de deformación máxima.

I trans (cm4)	Deformacion max (cm)
858439.0950	0.00000639
858439.0950	0.00000639
858267.3086	0.00000639
858267.3086	0.00000639
741164.8159	0.00001021
35407.8694	0.00000057

3. Con esta deformación se encuentra la rigidez del sistema. Mediante la ecuación $K=P/\delta$

Tabla 3.- Tabla de rigidez.

Deformacion max (cm)	K Rigidez (Kn/cm)
0.00000639	156376.1472
0.00000639	156376.1472
0.00000639	156588.9523
0.00000639	156588.9523
0.00001021	97936.4254
0.00000057	1763345.6774

4. Obtenida la rigidez, se debe encontrar $\Delta\epsilon_p$. Se buscan las deformaciones máximas (positivas y negativas) de cada ciclo con sus respectivas fuerzas.



Fig. 6.- Deformaciones máximas positivas y negativas del ensayo # 3

5. Se aplican las ecuaciones de los coeficientes de Coffin y Manson, mostradas en el capítulo anterior. Las mismas fueron ingresadas en la hoja de Excel mostrada a continuación para facilitar el cálculo.

Tabla 4.- Tabla de Deformaciones Máximas con sus respectivas Fuerzas y $\Delta\epsilon_p$

Ciclos	Pico Positivo		Pico Negativo		Rigidez(kn/cm)	$\Delta\epsilon_p$
	Deformacion(mm)	Fuerza(kn)	Deformacion(mm)	Fuerza(kn)		
1	5.87	308.78	-9.50	-337.39	156588.9523	1.532523464
2	20.53	552.80	-21.11	-544.35	156588.9523	4.157193439
3	19.94	551.95	-20.88	-511.56	156588.9523	4.075308269
4	40.82	515.75	-42.23	-572.15	156588.9523	8.297852511
5	40.94	537.63	-41.29	-535.09	156588.9523	8.215849453
6	61.70	498.09	-62.41	-523.31	156588.9523	12.40387719
7	61.00	512.41	-62.05	-516.59	156588.9523	12.29822866
8	82.81	448.45	-82.81	-509.87	156588.9523	16.55668003
9	82.93	464.42	-82.70	-455.16	156588.9523	16.55692743
					Σ	84.09444044

6. Una vez ya obtenido $\Delta\epsilon_p$ se tantea α y C_f hasta que el daño se aproxime a 1.

Tabla 5.- Tabla de α , C_f y Daño (no hay valores en las primeras filas porque se saca factor común y solo se utiliza la última fila de la tabla).

Ciclos	α	C_f	D	C_d
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
	0.22	2.65	1.00212617	2.61

7. Luego se saca un promedio de ϕ_{sr} de los ensayos y se comienza a calibrar C_d hasta obtener un valor aproximado de ϕ_{sr} . Utilizan las ecuaciones de los coeficientes de Coffin y Manson, mostradas en el capítulo anterior, las mismas que se calculan una hoja de Excel para facilitar el cálculo:

Tabla 6.- Tabla de C_d , ϕ_{sr} y K_1

Ciclos	ϕ_{sr} (promedio)	ϕ_{sr}	K_1	C_d
1	1.790271391			
2	0.998462373			
3	0.934414349			
4	1.042423655			
5	0.926454997			
6	1.028749824			
7	0.87517808			
8	1.035611551			
9				
	1.078945778	1.07385785	1.07157949	2.61

8. En el último paso se ingresan los valores obtenidos en la herramienta computacional de calibración.

Primeramente parecía que la metodología funcionaba, ya que la gráfica del análisis parecía ajustarse de una manera satisfactoria a la del ensayo. Pero después de calibrar más del 50% de los ensayos se observó que los valores de C_f y C_d eran muy altos. Se revisó que se podía obtener una mejor calibración con valores de C_f y C_d , entre 0 y 1. El valor de α obtenido mediante esta metodología sí fue aceptable.

2.2 Segunda metodología de la Calibración propuesta

Por lo mencionado en la primera metodología se buscó una segunda metodología que fuera más visual.

La calibración de los parámetros omega, gamma y #Pasos es igual que en la primera metodología. La calibración de α , C_f y C_d se la hizo partiendo de los valores sugeridos por Brown y Kunnath(2000) y siguiendo las siguientes pautas:

- Si se disminuye el valor de α , el área encerrada por los ciclos de histéresis aumenta y la gráfica rota ligeramente en contra de las manecillas del reloj, es decir, la energía disipada es mayor. En las figuras 7 y 8 se puede observar cómo afecta la variación del parámetro α en el análisis.

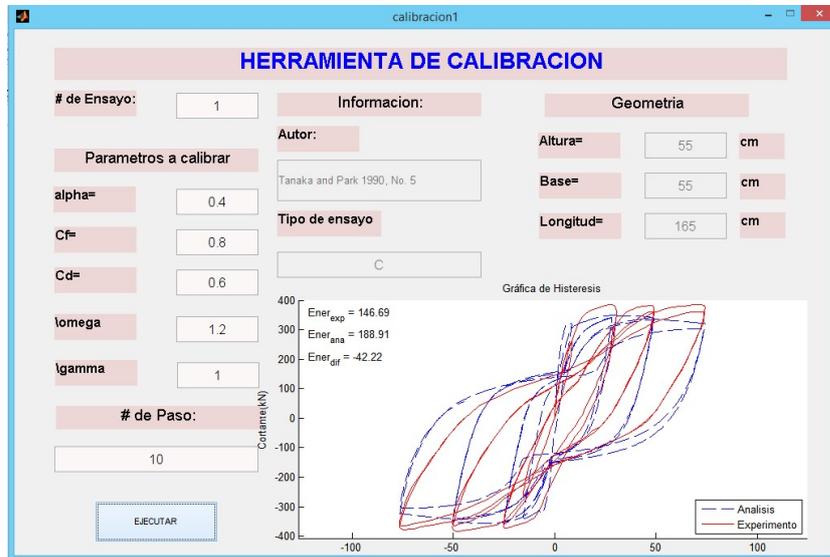


Fig. 7.- Gráfica histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de α bajo.

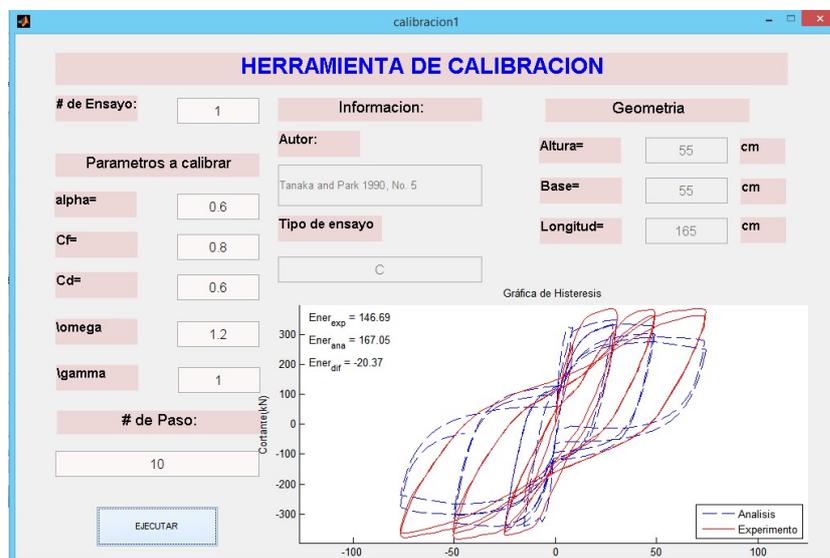


Fig. 8.- Gráfica histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de α medio.

- Al aumentar el valor de α , la gráfica rota a favor de las manecillas del reloj y el área encerrada por los ciclos de histéresis disminuye (se observa que la gráfica se estrangula), esto indica que la energía disipada

es menor. En la figura 9 se puede observar cómo afecta la variación del parámetro α en el análisis.

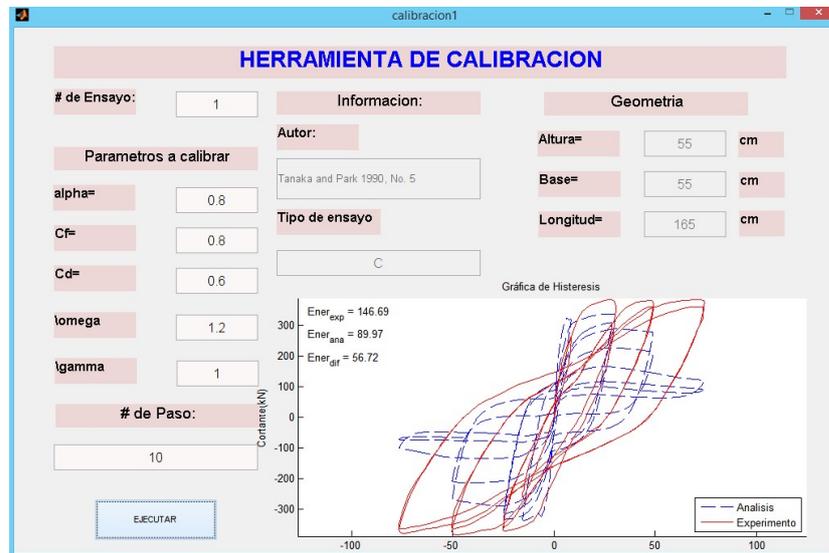


Fig. 9.- Gráfica de histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de α alto.

- La calibración C_f depende del último ciclo del ensayo. Se debe aumentar o disminuir el valor de C_f dependiendo del ensayo hasta que el último ciclo del análisis se ajuste al último ciclo del ensayo. En las figuras 10 y 11 se puede observar cómo afecta la variación del parámetro C_f en el análisis.

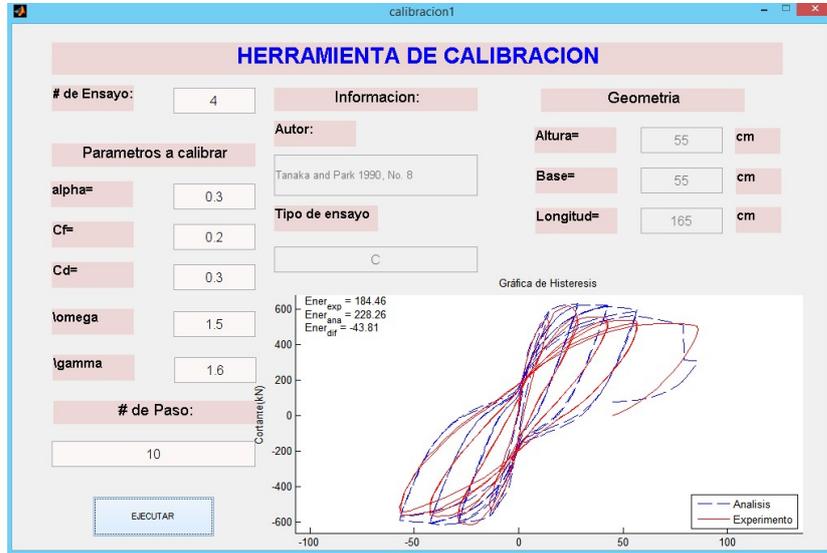


Fig. 10.- Gráfica de histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de C_f sin calibrar.

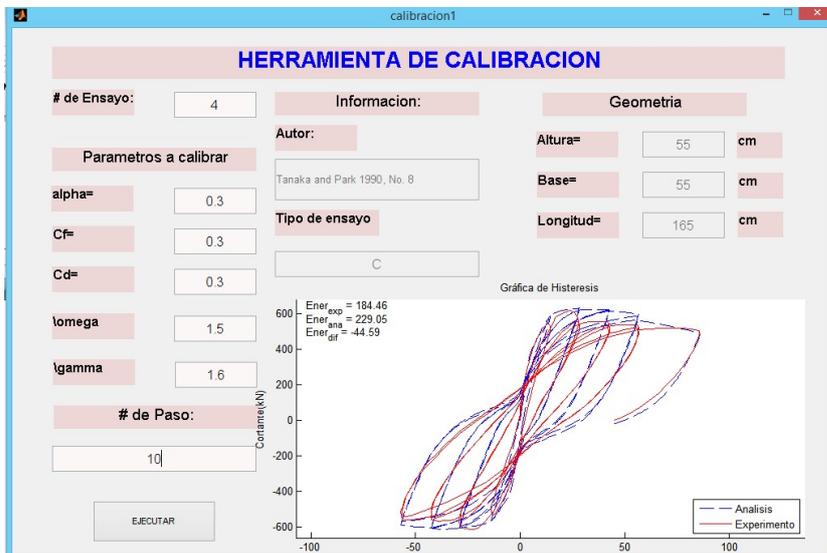


Fig. 11.- Gráfica de histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de C_f calibrado.

- Si se disminuye el valor de C_d , la gráfica rota ligeramente a favor de las manecillas del reloj y las ordenadas disminuyen en los últimos ciclos. En la figura 12 se puede observar cómo afecta la variación del parámetro C_d en el análisis.

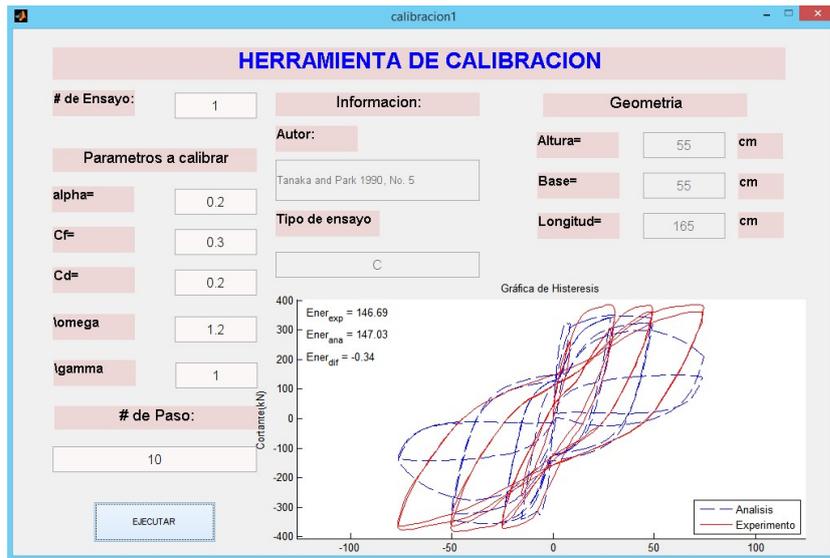


Fig. 12.- Gráfica de histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de C_d bajo.

- Al aumentar el valor de C_d , la gráfica rota en contra de las manecillas del reloj y las ordenadas aumentan en los últimos ciclos. En las figuras 13 y 14 se puede observar cómo afecta la variación del parámetro C_d en el análisis.

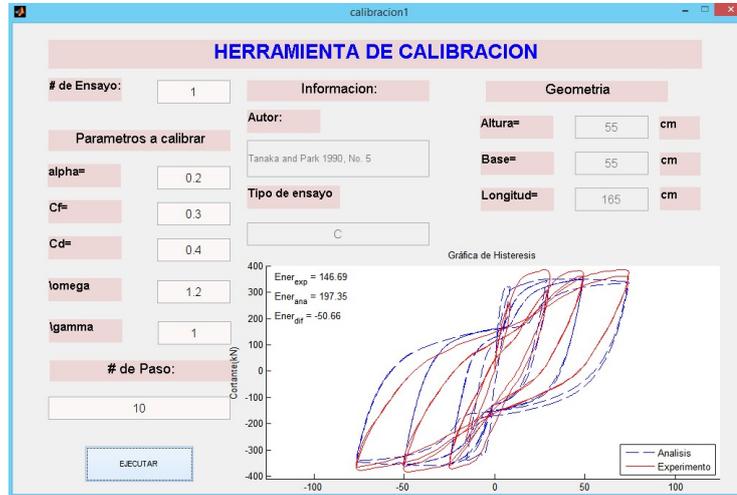


Fig. 13.- Gráfica de histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de C_d medio.

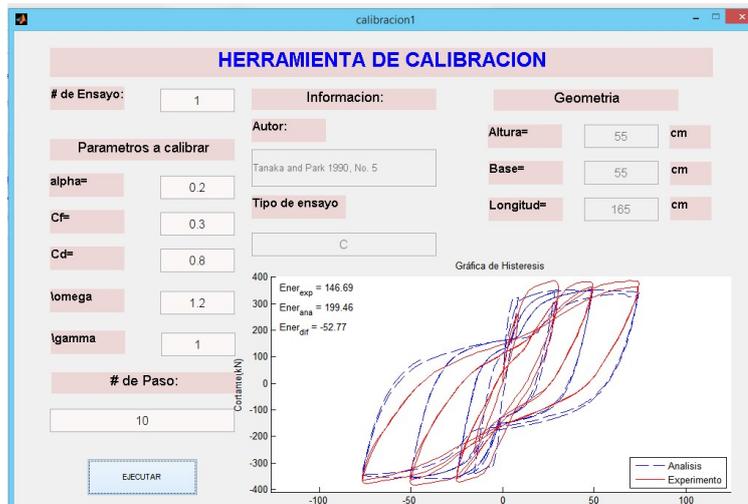


Fig. 14.- Gráfica de histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total con un valor de C_d alto.

Capítulo 3

3.1 Resultados de la Calibración

En este capítulo se mostrarán los resultados de la calibración de los 88 ensayos, aplicando la metodología propuesta. En la siguiente tabla se muestran los ensayos que pudieron ser calibrados y los ensayos que no pudieron ser calibrados se indica el porqué.

Tabla 7.- Tabla de Comentarios de la calibración de los 88 ensayos.

Ensayo	Comentarios
1-7	OK
8-10	No se logró convergencia
11,12	OK
13,14	No se logró convergencia
15-18	OK
19,20	No se ajusta la gráfica
21-28	OK
29-33	No se logró convergencia
34-36	OK
37	No se logró convergencia
38-41	OK
42	No se logró convergencia
43	OK
44	No se logró convergencia
45-47	OK
48	No se ajusta la gráfica
47-55	OK
56	Sale la misma gráfica cada vez

Ensayo	Comentarios
57	No se logró convergencia
58-60	No se ajusta la gráfica
61	No afecta a la gráfica si cambio los valores
62	No se ajusta la gráfica
63	No afecta a la gráfica si cambio los valores
64	OK
65	No afecta a la gráfica si cambio los valores
66	No se ajusta la gráfica
66,67	OK
68	No afecta a la gráfica si cambio los valores
69-71	OK
72,73	No se ajusta la gráfica
73-78	OK
79	No se logró convergencia
80-84	OK
85-86	No se ajusta la gráfica
87-88	OK

Tabla 8.- Tabla de resumen de comentarios

# de Ensayos	Estatus
56	Calibrados
15	No se logró convergencia
17	No Calibrados
88	Total

A continuación se presenta un resumen de los valores de α , C_f , C_d , omega, gamma y el número de pasos con los que cada ensayo fue calibrado.

Tabla 9.- Tabla de resumen de valores α , C_f , C_d , omega, gamma y #Pasos.

Tabla de Resumen de los Valores de α , C_f , y C_d						
Ensayo	α	C_f	C_d	omega	gamma	#Pasos
1	0.2	0.3	0.4	1.2	1	10
2	0.2	0.4	0.6	1	0.95	20
3	0.2	0.3	0.3	1.5	1.3	5
4	0.3	0.3	0.3	1.5	1.6	10
5	0.2	0.6	0.4	1.4	1	30
6	0.3	0.4	0.3	1.3	1.3	10
7	0.4	0.2	0.2	0.9	0.9	10
11	0.55	0.29	0.3	1	1	10
12	0.75	0.4	0.3	1.2	0.8	10
15	0.9	0.3	0.4	1	1	10
16	0.7	0.25	0.5	1	1	10
17	0.7	0.4	0.3	1	1	30
18	0.4	0.2	0.2	1	1	10
21	0.4	0.22	0.26	1.2	1.2	10
22	0.45	0.24	0.34	1.4	1.4	10
23	0.45	0.25	0.3	1.3	1.3	10
24	0.5	0.3	0.1	1.4	1.4	10
25	0.9	0.25	0.9	1.2	1.2	10
26	0.3	0.1	0.1	1.3	1.3	10
27	0.7	0.4	0.6	1.1	1.1	10
28	0.2	0.1	0.1	1	1	10
34	0.8	0.1	0.4	1	1	10

Ensayo	α	Cf	Cd	omega	gamma	#Pasos
35	0.6	0.8	0.3	1.4	1.4	10
36	0.6	0.8	1	1.1	1.1	10
38	0.5	0.5	0.5	1	1	10
39	0.1	0.26	0.3	1	1	10
40	0.193	0.26	0.389	1	1	10
41	0.2	0.6	0.5	1.1	1.1	10
43	0.3	0.26	0.389	1.4	1.4	20
45	0.2	0.2	0.389	1	1	15
46	0.9	0.1	0.1	1	1	30
47	0.6	0.2	0.389	1.2	1.2	10
49	0.9	0.3	0.4	1	1	10
50	0.4	0.26	0.4	1	1	10
51	0.4	0.25	0.4	1	1	10
52	0.3	0.26	0.3	1	1	10
53	0.3	0.24	0.3	1	1	20
54	0.3	0.2	0.4	1	1	10
55	0.51	0.2	0.39	1	1	10
64	0.7	0.3	0.4	1	1	10
67	0.4	0.3	0.3	1	1	10
69	0.6	0.1	0.1	1.2	1.2	10
70	0.4	0.2	0.3	1.5	1.5	10
71	0.1	0.2	0.1	1.3	1.3	20
74	0.4	0.2	0.2	1.4	1.4	10
75	0.2	0.3	0.2	1.3	1.3	10
76	0.3	0.2	0.4	1.3	1.3	10
77	0.2	0.2	0.2	1.4	1.4	10
78	0.2	0.1	0.2	1.4	1.4	10
80	0.4	0.5	0.38	1.1	1.1	10
81	0.3	0.3	0.3	1.2	1.2	10
82	0.2	0.2	0.3	1.3	1.3	10
83	0.2	0.2	0.2	1.2	1.2	10
84	0.2	0.2	0.2	1.4	1.4	10
87	0.2	0.2	0.2	1.1	1.1	10
88	0.25	0.2	0.3	1.3	1.3	10

Una vez que se obtuvieron los valores de α , C_f , C_d , omega y gamma con los que cada ensayo fue calibrado se generaron gráficas de dispersión con estos valores y ciertas características claves de cada ensayo. Las correlaciones consideradas de los ensayos fueron:

- d_b/s : Diámetro de la varilla longitudinal entre espaciado del estribo, que son los parámetros relacionados a la posibilidad de pandeo de las varillas longitudinales.
- Rho : $A_{s_{long}}/A_g$: Área de acero longitudinal entre área gruesa de la sección, para revisar cuantía longitudinal.
- Rho_{sh} : $A_{s_{trans}}/A_g$: Área de acero transversal entre área gruesa de la sección, para revisar cuantía transversal y cómo afecta la resistencia al corte a la degradación.
- L_s/h : Longitud de la columna entre dimensión de la columna en la dirección del ensayo.
- F_y : Esfuerzo de fluencia, para revisar la afectación en función de la resistencia del acero.
- f'_c : Esfuerzo máximo de compresión, para revisar la afectación de la resistencia del concreto.
- $(P/A_g)/f'_c$: Carga axial por área gruesa de la sección y todo esto entre el esfuerzo máximo de compresión, para medir la afectación por la carga axial que soporta el elemento.

Tabla 10. Tabla de Correlaciones de los ensayos para db/s y rho

Ensayo	Diameter (cm)	Spacing (cm)	Spacing (cm)	db/s	Total # Bars	As long (cm ²)	Ag(cm ²)	rho
1	2	11	22	0.121	12	37.70	3025.00	0.012
2	2	11	22	0.121	12	37.70	3025.00	0.012
3	2	9	18	0.148	12	37.70	3025.00	0.012
4	2	9	18	0.148	12	37.70	3025.00	0.012
5	2.4	8	16	0.200	10	45.24	2400.00	0.019
6	0.95	3.2	0	0.297	6	4.25	625.00	0.007
7	1.27	2	0	0.635	4	5.07	400.00	0.013
11	1.6	5	0	0.320	4	8.04	400.00	0.020
12	1.3	5	0	0.260	8	10.62	400.00	0.027
15	1	4	0	0.250	8	6.28	256.00	0.025
16	1	4	0	0.250	8	6.28	256.00	0.025
17	1	4	0	0.250	8	6.28	256.00	0.025
18	1	4	0	0.250	8	6.28	256.00	0.025
21	1.27	5	0	0.254	8	10.13	625.00	0.016
22	1.27	5	0	0.254	8	10.13	625.00	0.016
23	1.27	5	0	0.254	8	10.13	625.00	0.016
24	1.27	5	0	0.254	8	10.13	625.00	0.016
25	1.27	5	0	0.254	8	10.13	625.00	0.016
26	1.27	5	0	0.254	8	10.13	625.00	0.016
27	0.95	7	0	0.136	12	8.51	400.00	0.021
28	0.95	7	0	0.136	12	8.51	400.00	0.021
34	1.27	6	0	0.212	12	15.20	625.00	0.024
35	1.9	3	0	0.633	4	11.34	625.00	0.018
36	1.3	5.2	0	0.250	16	21.24	772.84	0.027
38	2.5	7.5	0	0.333	8	39.27	1225.00	0.032
39	2.5	5	0	0.500	8	39.27	1225.00	0.032
40	2.5	6.5	0	0.385	8	39.27	1225.00	0.032
41	2.5	6.5	0	0.385	8	39.27	1225.00	0.032
43	1.91	11	11	0.174	18	51.57	2318.00	0.022
45	1.91	8.3	8.3	0.230	18	51.57	2318.00	0.022
46	3.175	45.72	0	0.069	8	63.34	2090.32	0.030
47	2.54	45.72	0	0.056	8	40.54	2090.32	0.019
49	3.175	30.48	0	0.104	8	63.34	2090.32	0.030
50	1.91	5.1	0	0.375	8	22.92	645.16	0.036

Tabla 11. Tabla de Correlaciones de los ensayos para db/s y rho

Ensayo	Diameter (cm)	Spacing (cm)	Spacing (cm)	db/s	Total # Bars	As long (cm ²)	Ag(cm ²)	rho
51	1.91	5.1	0	0.375	8	22.92	645.16	0.036
52	1.59	5.1	0	0.312	8	15.88	645.16	0.025
53	1.59	5.1	0	0.312	8	15.88	645.16	0.025
54	1.59	5.1	0	0.312	8	15.88	645.16	0.025
55	1.59	5.1	0	0.312	8	15.88	645.16	0.025
64	1.954	10	0	0.195	8	23.99	930.25	0.026
67	1.954	9.4	0	0.208	8	23.99	930.25	0.026
69	1.95	15.2	0	0.128	8	23.89	1225.00	0.020
70	1.95	7.6	0	0.257	8	23.89	1225.00	0.020
71	1.95	7.6	0	0.257	8	23.89	1225.00	0.020
74	2.99	7.6	0	0.393	4	28.09	1225.00	0.023
75	1.95	7.6	0	0.257	12	35.84	1225.00	0.029
76	1.95	7.6	0	0.257	12	35.84	1225.00	0.029
77	1.6	7.6	0	0.211	20	40.21	1225.00	0.033
78	1.6	7.6	0	0.211	20	40.21	1225.00	0.033
80	1.59	7.62	7.62	0.209	4	7.94	412.09	0.019
81	1.59	7.62	7.62	0.209	4	7.94	412.09	0.019
82	1.59	7.72	7.72	0.206	4	7.94	412.09	0.019
83	1.59	7.62	7.62	0.209	4	7.94	412.09	0.019
84	1.59	7.72	7.72	0.206	4	7.94	412.09	0.019
87	1.59	7.62	7.62	0.209	4	7.94	412.09	0.019
88	1.59	7.72	7.72	0.206	4	7.94	412.09	0.019

Tabla 12. Tabla de Correlaciones de los ensayos para rho_sh y Ls/h

Ensayo	Ag(cm ²)	Bar Dia. (cm)	Bar Dia. (cm)	As trans (cm ²)	rho_sh	Ls(cm)	h(cm)	Ls/h
1	3025.00	1.2	1.2	11.31	0.0037	165	55	3.00
2	3025.00	1.2	1.2	11.31	0.0037	165	55	3.00
3	3025.00	1.2	1.2	13.57	0.0045	165	55	3.00
4	3025.00	1.2	1.2	13.57	0.0045	165	55	3.00
5	2400.00	1.2	1.2	18.10	0.0075	178.4	40	4.46
6	625.00	0.55	0	0.24	0.0004	37.5	25	1.50
7	400.00	0.55	0	0.24	0.0006	30	20	1.50
11	400.00	0.55	0	0.24	0.0006	40	20	2.00
12	400.00	0.55	0	0.24	0.0006	40	20	2.00
15	256.00	0.5	0	0.20	0.0008	32	16	2.00
16	256.00	0.5	0	0.20	0.0008	32	16	2.00
17	256.00	0.5	0	0.20	0.0008	32	16	2.00
18	256.00	0.5	0	0.20	0.0008	48	16	3.00
21	625.00	0.55	0	0.24	0.0004	75	25	3.00
22	625.00	0.55	0	0.24	0.0004	75	25	3.00
23	625.00	0.55	0	0.24	0.0004	75	25	3.00
24	625.00	0.55	0	0.24	0.0004	75	25	3.00
25	625.00	0.55	0	0.24	0.0004	75	25	3.00
26	625.00	0.55	0	0.24	0.0004	75	25	3.00
27	400.00	0.6	0	0.28	0.0007	30	20	1.50
28	400.00	0.6	0	0.28	0.0007	30	20	1.50
34	625.00	0.7	0	0.77	0.0012	50	25	2.00
35	625.00	0.5	0	0.39	0.0006	50	25	2.00
36	772.84	0.6	0	0.28	0.0004	32.3	27.8	1.16
38	1225.00	1	0	0.79	0.0006	100	35	2.86
39	1225.00	1	0	0.79	0.0006	100	35	2.86
40	1225.00	0.64	0	0.32	0.0003	100	35	2.86
41	1225.00	0.64	0	0.32	0.0003	100	35	2.86
43	2318.00	0.6	0.95	10.34	0.0045	233.5	38	6.14
45	2318.00	0.6	0.95	13.03	0.0056	233.5	38	6.14
46	2090.32	0.9525	0	2.14	0.0010	147.32	45.72	3.22
47	2090.32	0.9525	0	2.14	0.0010	147.32	45.72	3.22
49	2090.32	0.9525	0	2.85	0.0014	147.32	45.72	3.22
50	645.16	0.95	0	6.38	0.0099	50.8	25.4	2.00

Tabla 13. Tabla de Correlaciones de los ensayos para rho_sh y Ls/h

Ensayo	Ag(cm ²)	Bar Dia. (cm)	Bar Dia. (cm)	As trans (cm ²)	rho_sh	Ls(cm)	h(cm)	Ls/h
51	645.16	0.95	0	6.38	0.0099	50.8	25.4	2.00
52	645.16	0.95	0	6.38	0.0099	50.8	25.4	2.00
53	645.16	0.95	0	6.38	0.0099	50.8	25.4	2.00
54	645.16	0.64	0	2.90	0.0045	50.8	25.4	2.00
55	645.16	0.64	0	2.90	0.0045	50.8	25.4	2.00
64	930.25	1.598	0	30.08	0.0323	184.2	30.5	6.04
67	930.25	1.128	0	15.99	0.0172	184.2	30.5	6.04
69	1225.00	0.953	0	7.85	0.0064	164.5	35	4.70
70	1225.00	0.953	0	15.69	0.0128	164.5	35	4.70
71	1225.00	0.953	0	15.69	0.0128	164.5	35	4.70
74	1225.00	0.953	0	15.69	0.0128	164.5	35	4.70
75	1225.00	0.66	0	7.53	0.0061	164.5	35	4.70
76	1225.00	0.66	0	7.53	0.0061	164.5	35	4.70
77	1225.00	0.66	0	7.53	0.0061	164.5	35	4.70
78	1225.00	0.953	0	15.69	0.0128	164.5	35	4.70
80	412.09	0.95	0.95	1.42	0.0034	61	20.3	3.00
81	412.09	0.95	0.95	1.42	0.0034	61	20.3	3.00
82	412.09	0.95	0.95	1.42	0.0034	61	20.3	3.00
83	412.09	0.95	0.95	1.42	0.0034	61	20.3	3.00
84	412.09	0.95	0.95	1.42	0.0034	61	20.3	3.00
87	412.09	0.95	0.95	1.42	0.0034	61	20.3	3.00
88	412.09	0.95	0.95	1.42	0.0034	61	20.3	3.00

Tabla 14. Tabla de Correlaciones de los ensayos para f_y , f'_c , y $(P*Ag)/f'_c$

Ensayo	f_y (Kg/cm ²)	f'_c (Kg/cm ²)	No. of Hoop Sets	No. of Hoop Sets	Axial Load(Kg)	$(P/Ag)/f'_c$
1	5210.75	326.31	6	4	98708.53	0.100
2	5210.75	326.31	6	4	98708.53	0.100
3	5210.75	327.33	7	5	297043.33	0.300
4	5210.75	327.33	7	5	297043.33	0.300
5	4405.17	274.30	9	7	65873.67	0.100
6	4005.45	210.06	1	0	43745.83	0.333
7	3783.15	214.14	1	0	29979.66	0.350
11	3762.75	326.31	1	0	18660.81	0.143
12	3772.95	304.90	1	0	18660.81	0.153
15	3477.23	215.16	1	0	44051.74	0.800
16	3477.23	215.16	1	0	44051.74	0.800
17	3477.23	215.16	1	0	49558.21	0.900
18	3477.23	293.68	1	0	52719.33	0.701
21	3813.74	284.50	1	0	18762.78	0.106
22	3813.74	284.50	1	0	18762.78	0.106
23	3813.74	284.50	1	0	18762.78	0.106
24	3813.74	252.89	1	0	18762.78	0.119
25	3813.74	284.50	1	0	18762.78	0.106
26	3813.74	284.50	1	0	18762.78	0.106
27	3681.18	263.09	1	0	27022.48	0.257
28	3681.18	263.09	1	0	64853.95	0.616
34	3864.72	1014.62	2	0	221890.25	0.350
35	3456.84	1014.62	2	0	221890.25	0.350
36	4496.95	472.13	1	0	268389.31	0.736
38	4384.78	354.86	1	0	61182.97	0.141
39	4466.36	326.31	1	0	61182.97	0.153
40	4456.16	380.35	1	0	61182.97	0.131
41	4456.16	397.69	1	0	61182.97	0.126
43	4568.33	277.36	9	11	153467.29	0.239
45	4568.33	286.54	11	14	154385.03	0.232
46	3374.85	274.30	3	0	51291.73	0.089
47	3374.85	337.53	3	0	51291.73	0.073

Tabla 15. Tabla de Correlaciones de los ensayos para f_y , f'_c , y $(P*Ag)/f'_c$

Ensayo	f_y (Kg/cm ²)	f'_c (Kg/cm ²)	No. of Hoop Sets	No. of Hoop Sets	Axial Load(Kg)	$(P/Ag)/f'_c$
49	3374.85	260.03	4	0	154181.09	0.284
50	5200.55	774.98	9	0	49864.12	0.100
51	5200.55	774.98	9	0	99830.22	0.200
52	5200.55	876.96	9	0	54452.85	0.096
53	5200.55	876.96	9	0	108905.69	0.192
54	5200.55	876.96	9	0	54452.85	0.096
55	5200.55	876.96	9	0	108905.69	0.192
64	4629.51	733.18	15	0	340993.10	0.500
67	4629.51	1040.11	16	0	435418.82	0.450
69	4645.42	346.70	11	0	181713.43	0.428
70	4645.42	346.70	22	0	181713.43	0.428
71	4645.42	346.70	22	0	84738.42	0.200
74	4872.00	346.70	22	0	193746.08	0.456
75	4645.42	346.70	22	0	196091.43	0.462
76	4645.42	346.70	22	0	97994.73	0.231
77	4362.14	346.70	22	0	196091.43	0.462
78	4362.14	346.70	22	0	196091.43	0.462
80	5976.05	709.72	1	1	14479.97	0.050
81	5835.43	691.37	1	1	29061.91	0.102
82	5845.63	691.37	1	1	29061.91	0.102
83	5835.43	667.91	1	1	58021.85	0.211
84	5845.63	667.91	1	1	58021.85	0.211
87	5976.05	492.52	1	1	29061.91	0.143
88	5986.24	492.52	1	1	29061.91	0.143

3.2 Gráficos de dispersión con α

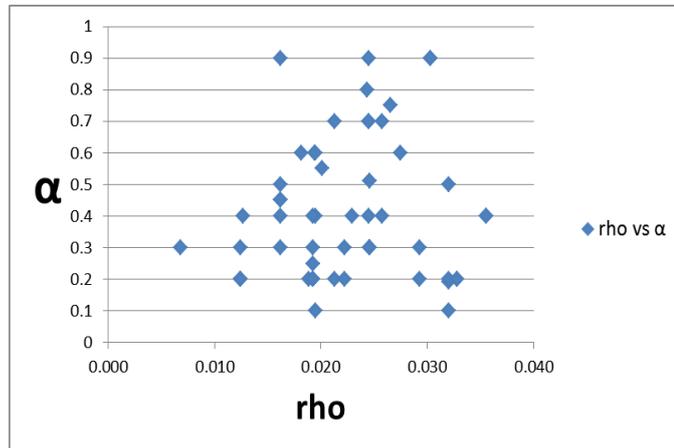


Fig. 15.- Gráfica de dispersión con rho

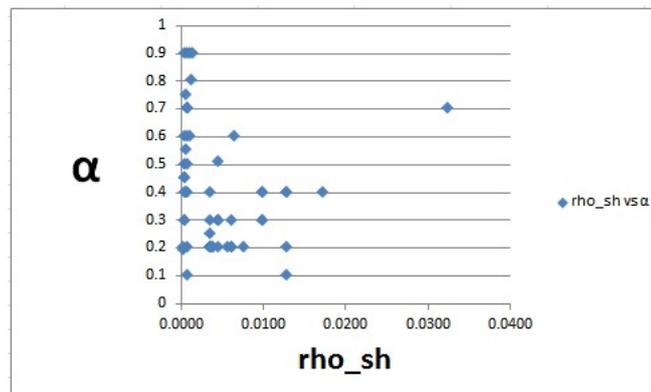


Fig. 16.- Gráfica de dispersión con rho_sh

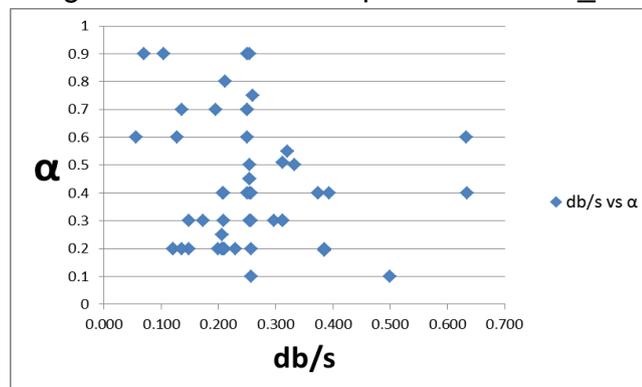


Fig. 17.- Gráfica de dispersión con db/s

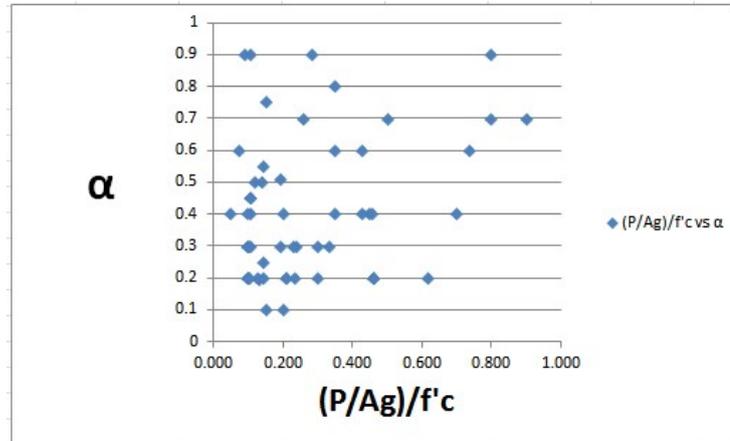


Fig. 18.-Gráfica de dispersión con $(P/Ag)/f'c$

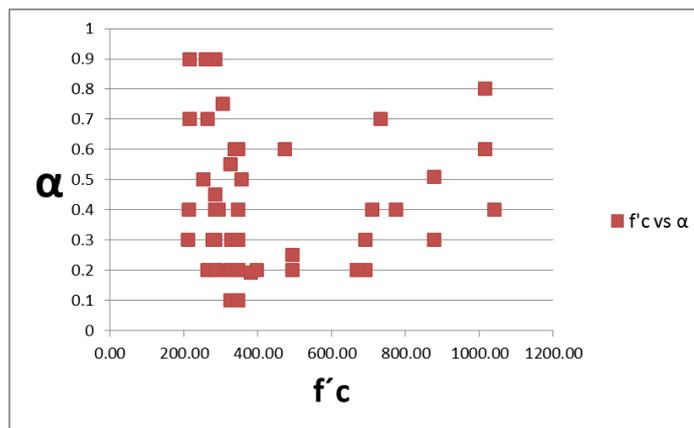


Fig. 19.- Gráfica de dispersión con $f'c$

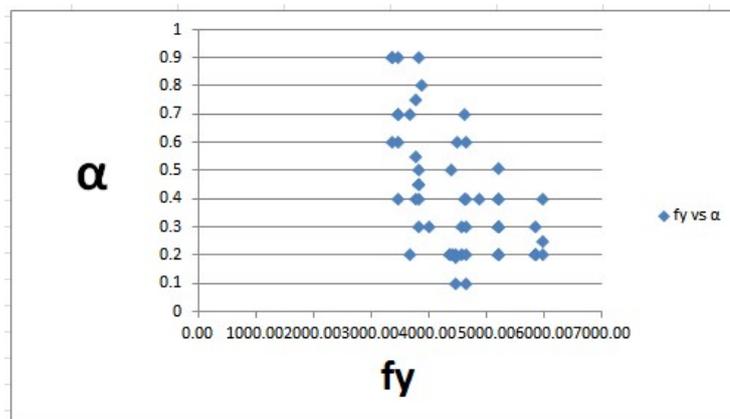


Fig. 20.-Gráfica de dispersión con f_y

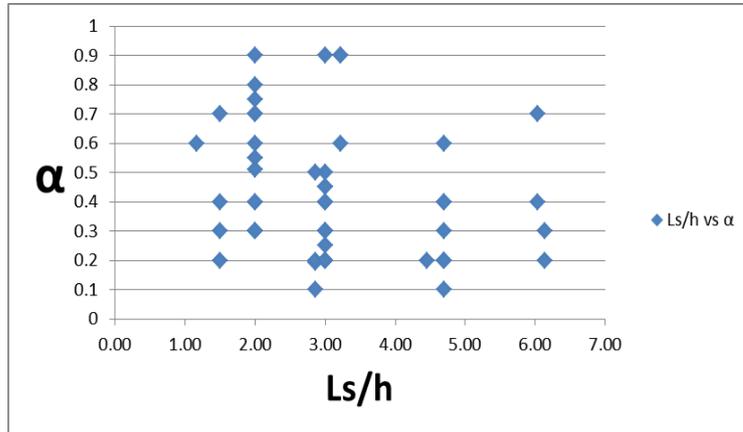


Fig. 21.- Gráfica de dispersión con Ls/h

3.3 Gráficos de dispersión con C_f

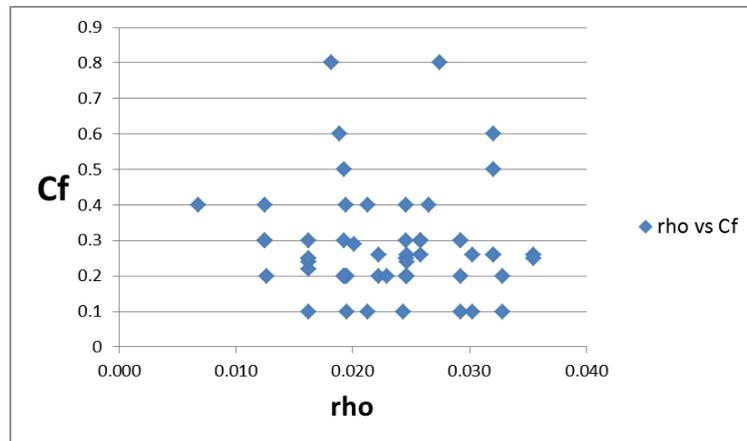


Fig. 22.- Gráfica de dispersión con rho

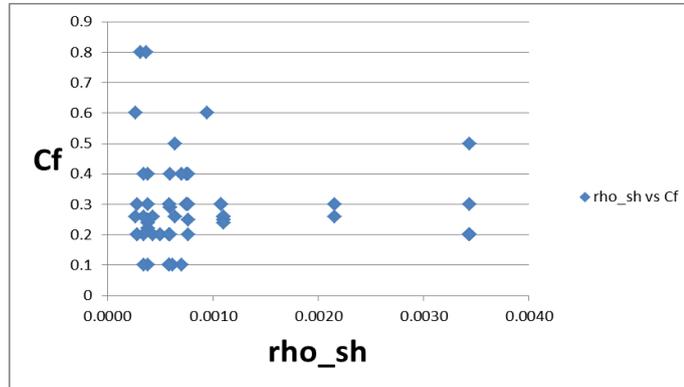


Fig. 23.-Gráfica de dispersión con ρ_{sh}

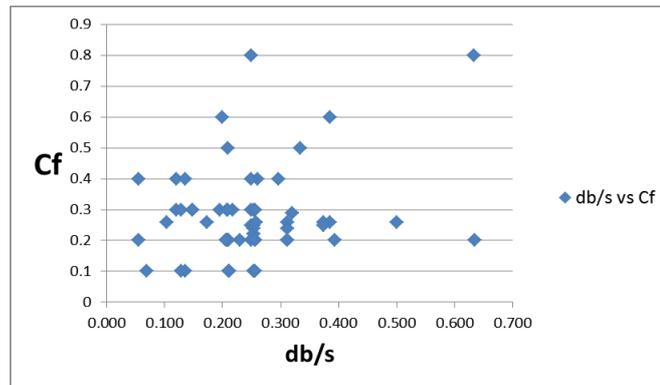


Fig. 24.-Gráfica de dispersión con db/s

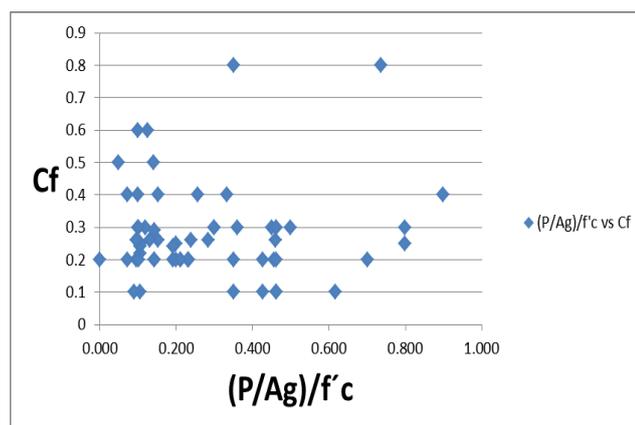


Fig. 25.- Gráfica de dispersión con $(P/Ag)/f'c$

3.4 Gráficos de dispersión con C_d

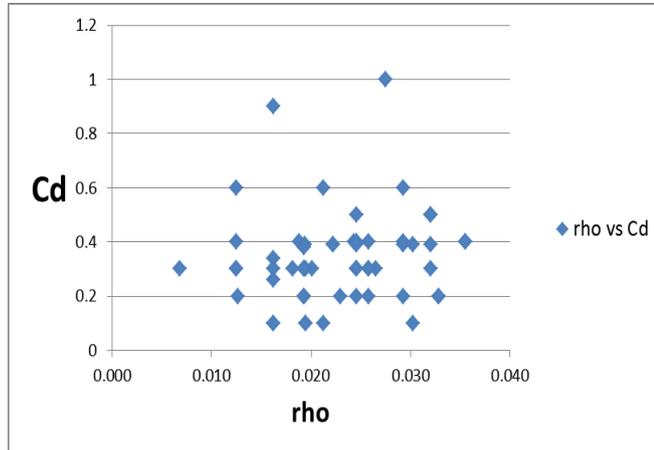


Fig. 29.-Gráfica de dispersión con ρ

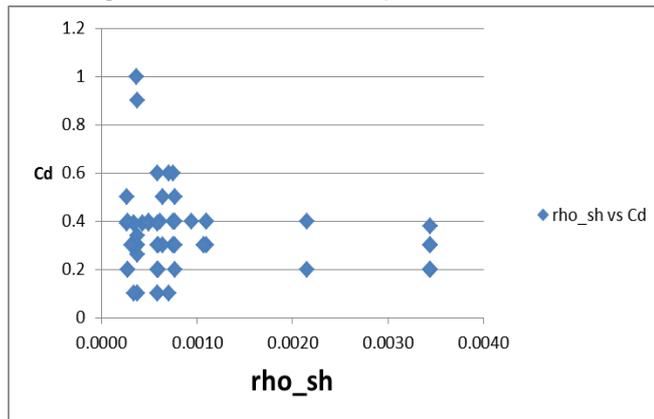


Fig. 30 .-Gráfica de dispersión con ρ_{sh}

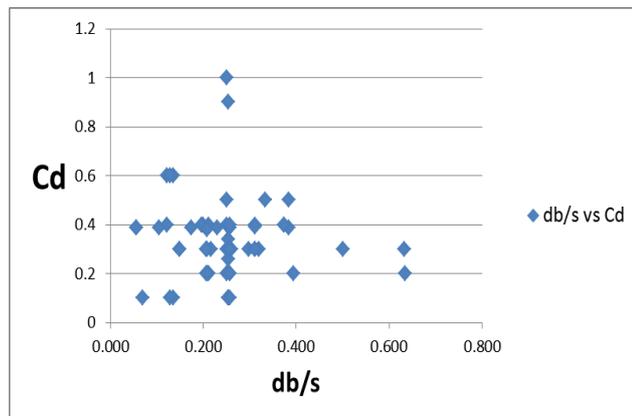


Fig. 31.-Gráfica de dispersión con db/s

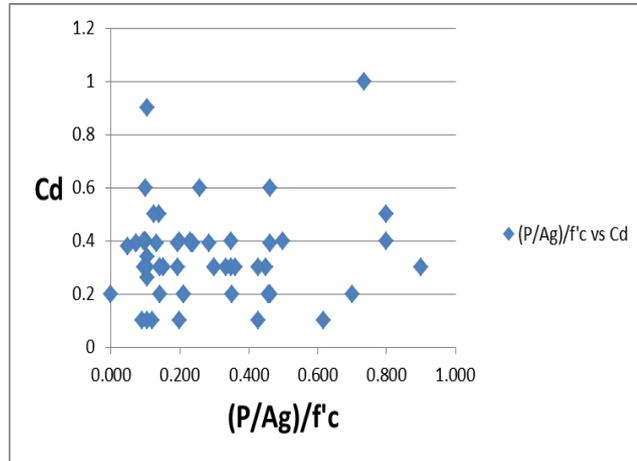


Fig. 32.-Gráfica de dispersión con $(P/Ag)/f'c$

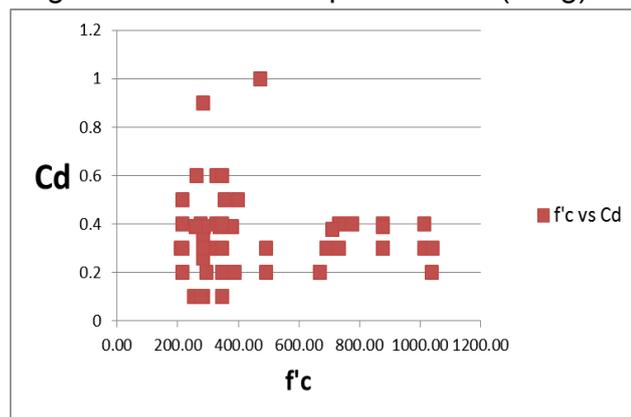


Fig. 33.-Gráfica de dispersión con $f'c$

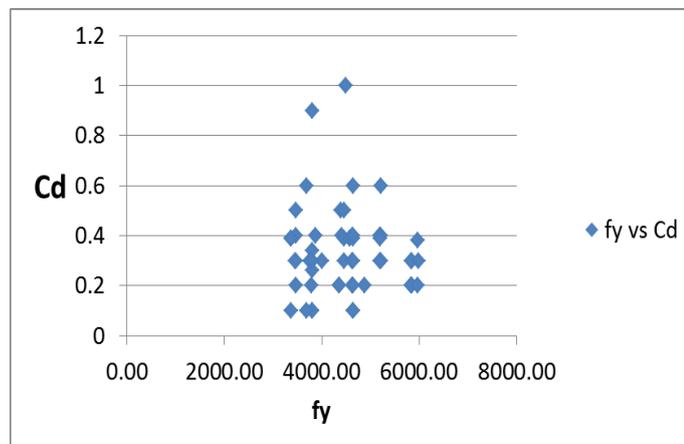


Fig. 34.-Gráfica de dispersión con f_y

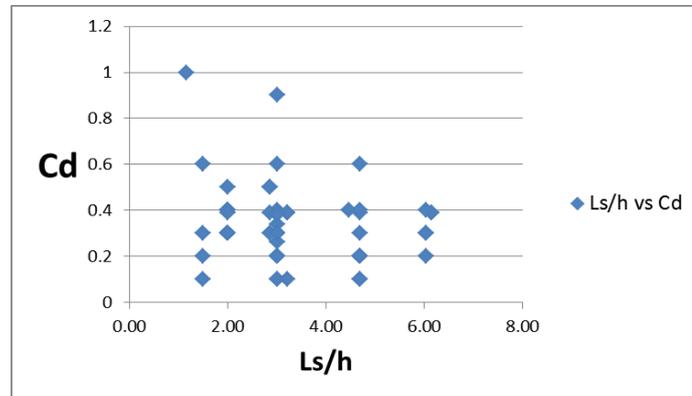


Fig. 35 .-Gráfica de dispersión con Ls/h

Capítulo 4

Conclusiones

- No todos los ensayos pudieron ser calibrados, pero se logró calibrar el 63% de los mismos. Esto quiere decir que la segunda metodología propuesta es aceptable y puede ser usada para calibrar la otra mitad de los ensayos que quedan pendientes de la base de datos.
- La primera metodología propuesta estuvo acertada en estimar valores de α .
- El 100% de los valores de α estuvieron entre 0.1 y 0.9
- Los valores de C_d y C_f que la primera metodología sugería eran muy altos, así que hubo que calibrar estos valores de otra manera. Se partió de los valores sugeridos por Brown y Kunnath(2000), que se encuentran en OpenSees(2010). Y se calibraron como se explica en la sección 2.2 de la metodología de calibración.
- Más del 90% de los valores de C_d y C_f resultaron entre 0.1 y 0.8
- Del 37% de los ensayos no se pudieron calibrar, el 17% presentaron problemas de convergencia y el 20% fue porque la gráfica del análisis nunca se ajustó a la del ensayo, tal vez el Ing. Condo pueda revisar el análisis de estos ensayos y encontrar el error.

Recomendaciones

- Para realizar este tipo de calibraciones, se recomienda el uso de la segunda metodología propuesta en el capítulo 2, pues en la primera parte de la metodología, toma mucho tiempo encontrar la deformación máxima con su respectiva fuerza en cada ensayo, ya que en algunos se tuvieron que realizar hasta 28 ciclos.
- Para calibrar α se recomienda ingresar valores entre 0.1 y 0.9
- Para calibrar C_f y C_d se recomienda ingresar valores entre 0.1 y 0.8
- Si fuera posible ajustar la herramienta computacional para que realice el análisis aumentando una décima el valor de α , C_f , C_d , cada corrida con cada uno, porque se requiere mucho tiempo en el ingreso de valores.
- Se recomienda empezar con omega y gamma igual a 1 y #Pasos igual a 10.

Bibliografía

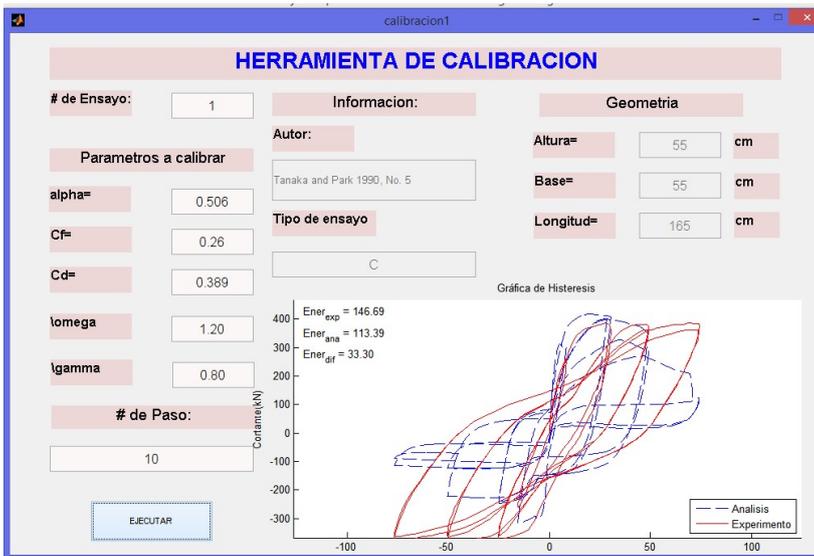
- Berry, M., Parrish, M., & Eberhard, M. (2004). *PEER Structural Performance Database User's Manual (Version 1.0)*. California: Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- FEMA/P695. (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors*. California: nehrp.
- Haselton, C. B., Goulet, C. A., Mitrani-Reiser, J., Beck, J. L., Deierlein, G. G., Porter, K. A., . . . Taciroglu, E. (2008). *An Assessment to Benchmark the Seismic Performance of a Code-Conforming Reinforced Concrete Moment-Frame Building*. California: Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Ibarra, L. F., Medina, R. A., & Krawinkler, H. (2005). *Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics.
- OpenSees. (16 de June de 2010). *opensees.berkeley.edu*. Obtenido de opensees.berkeley.edu:
http://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Reinforcing_Steel_Material
- Verri, A. D. (2003). *Modelación Numérica No-Lineal de Estructuras de Hormigón Armado Sometidas a Cargas Cíclicas*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.

Anexos

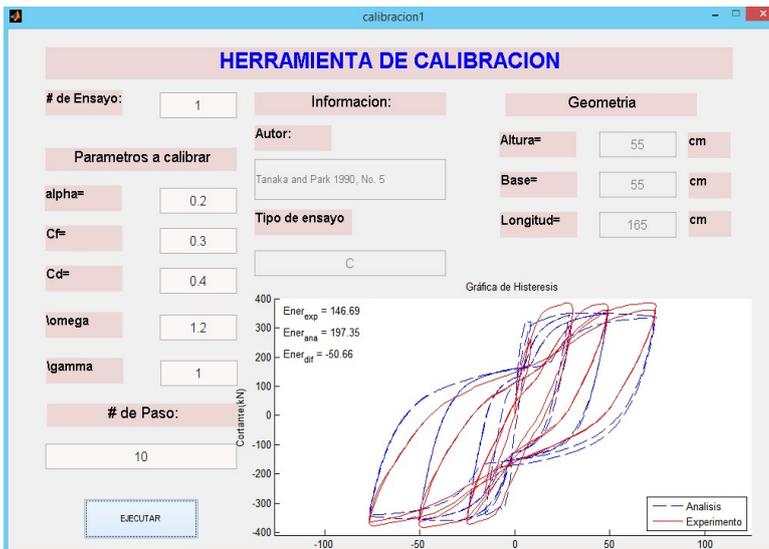
Gráfica de histéresis Fuerza cortante Vs. Deformación total

Ensayos Calibrados

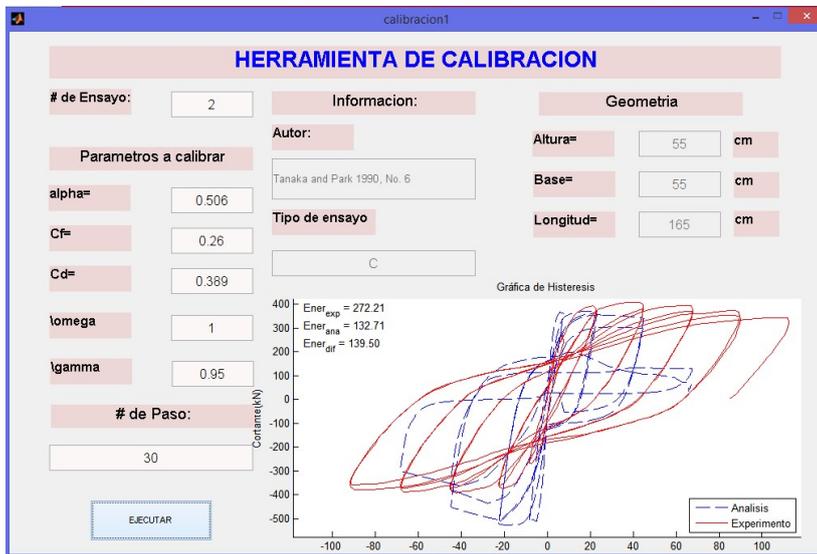
Antes de Calibrar



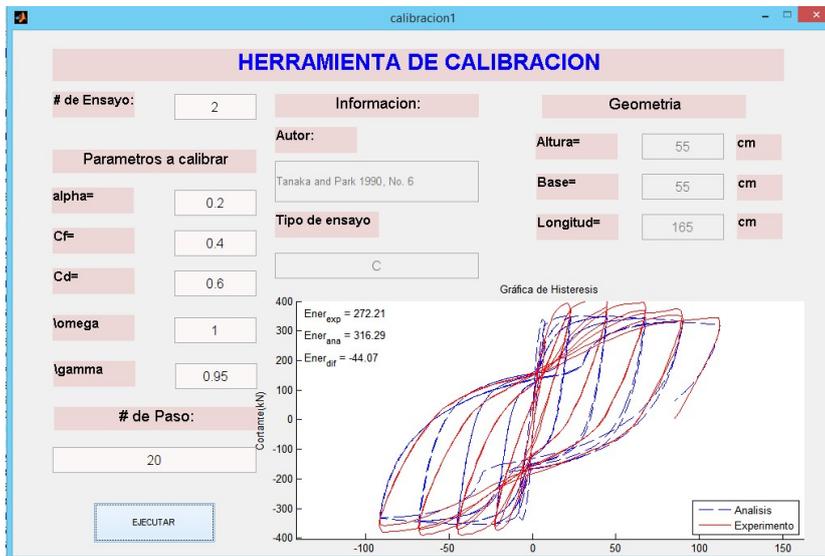
Después de Calibrar



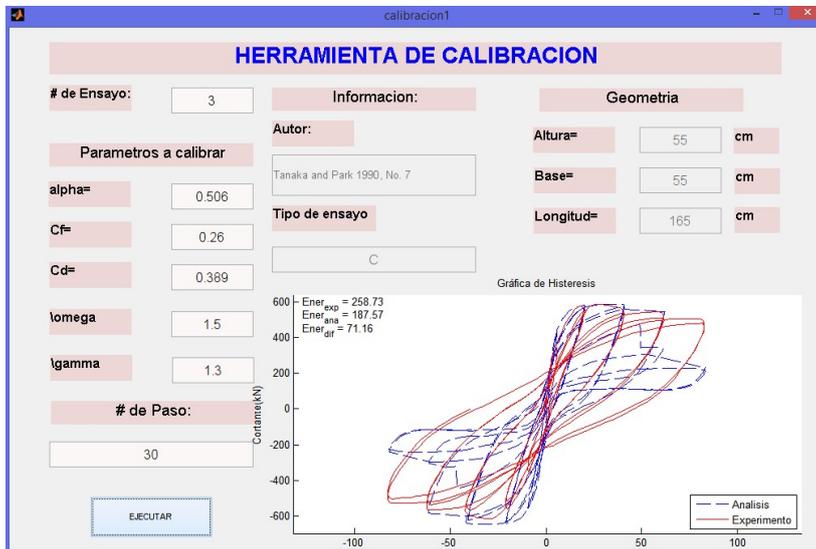
Antes de Calibrar



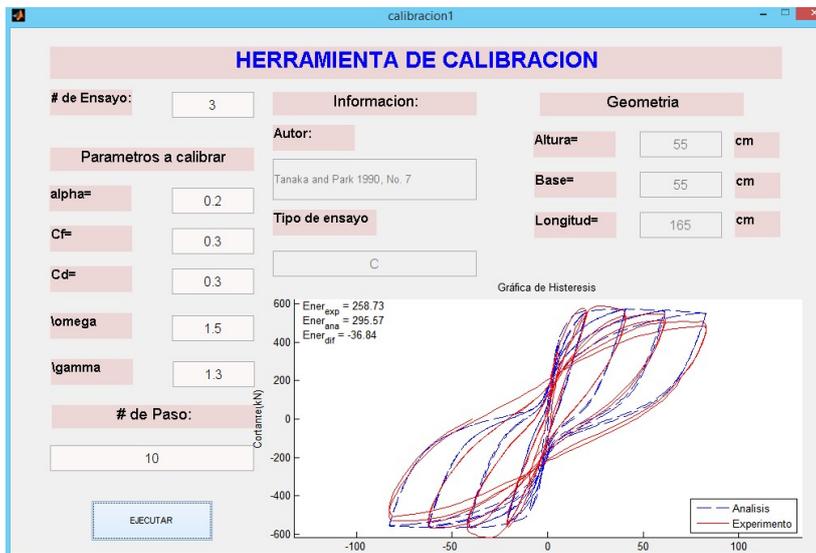
Después de Calibrar



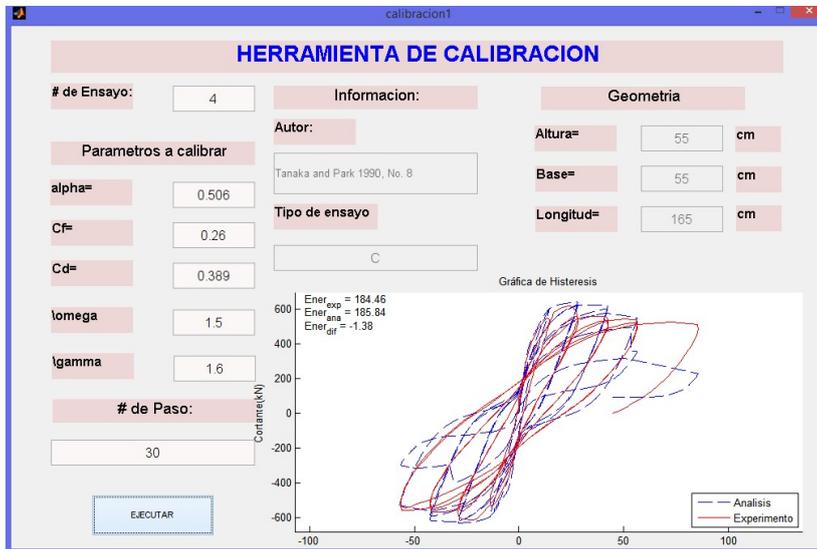
Antes de Calibrar



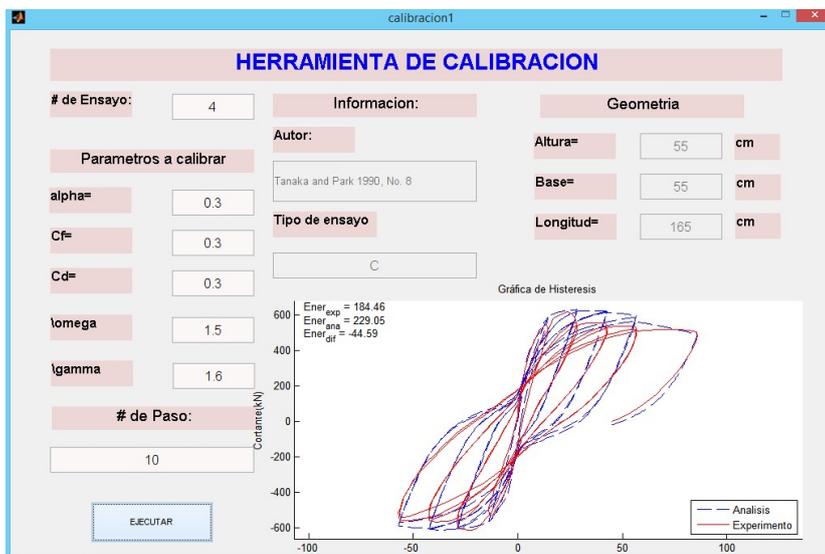
Después de Calibrar



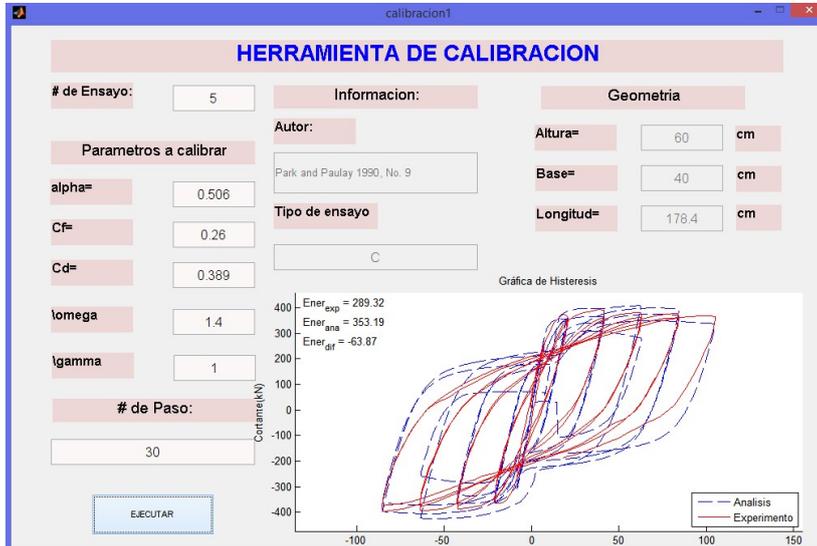
Antes de Calibrar



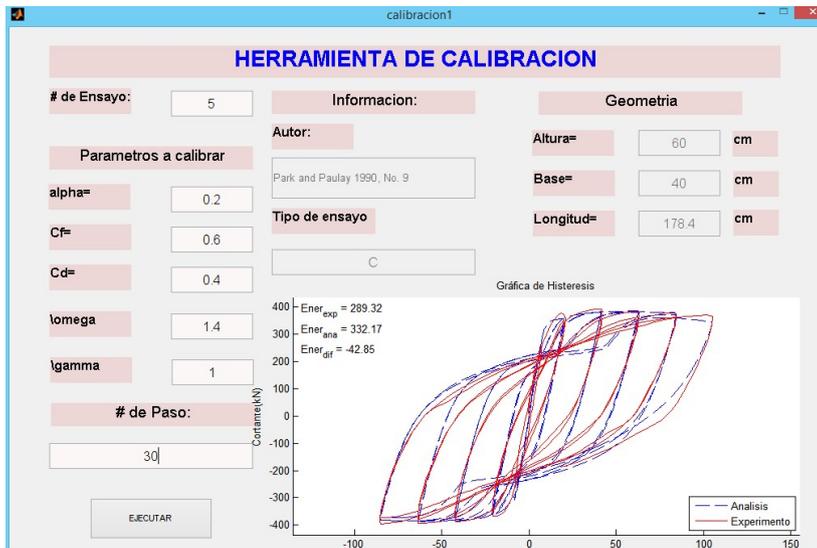
Después de Calibrar



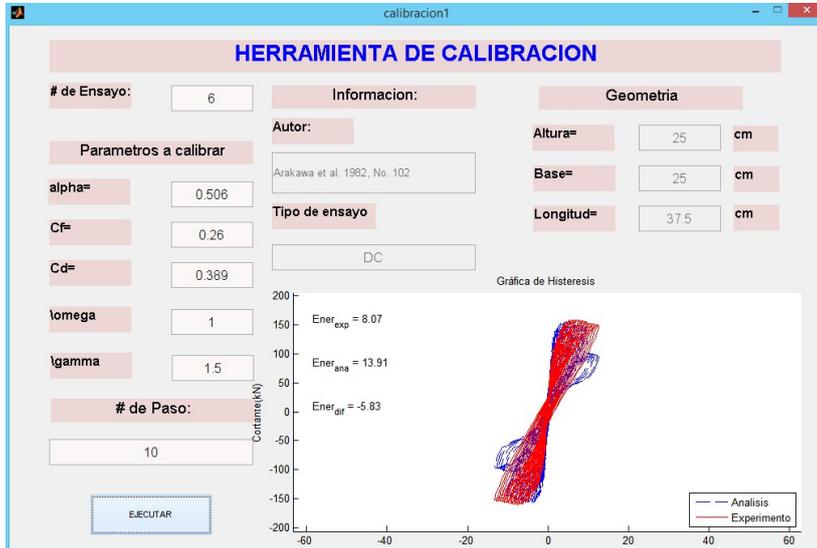
Antes de Calibrar



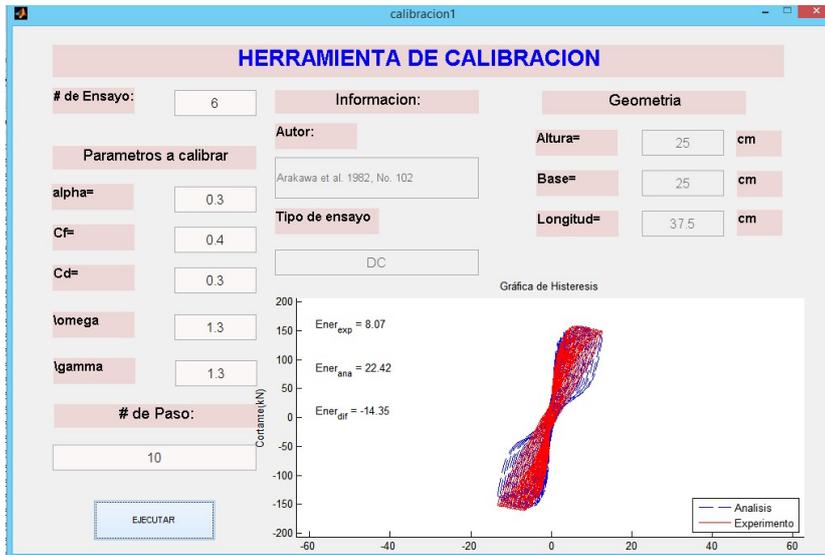
Después de Calibrar



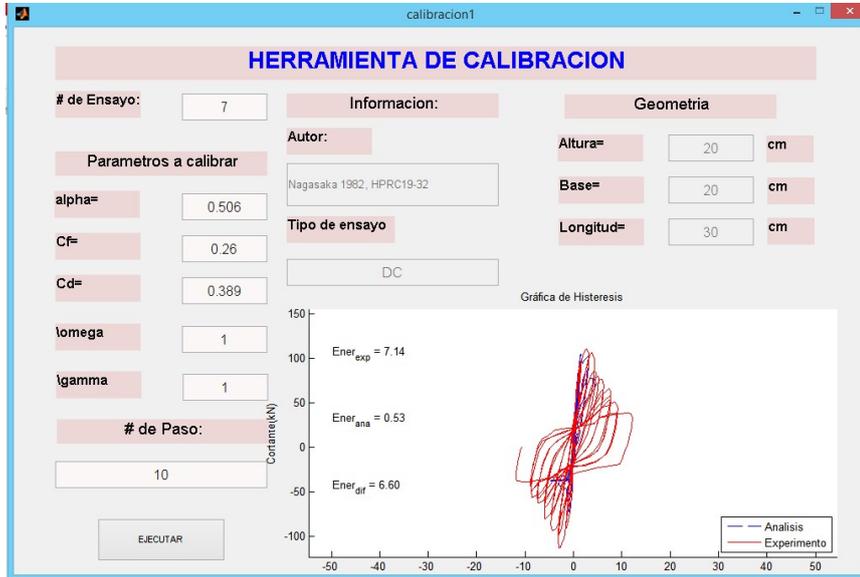
Antes de Calibrar



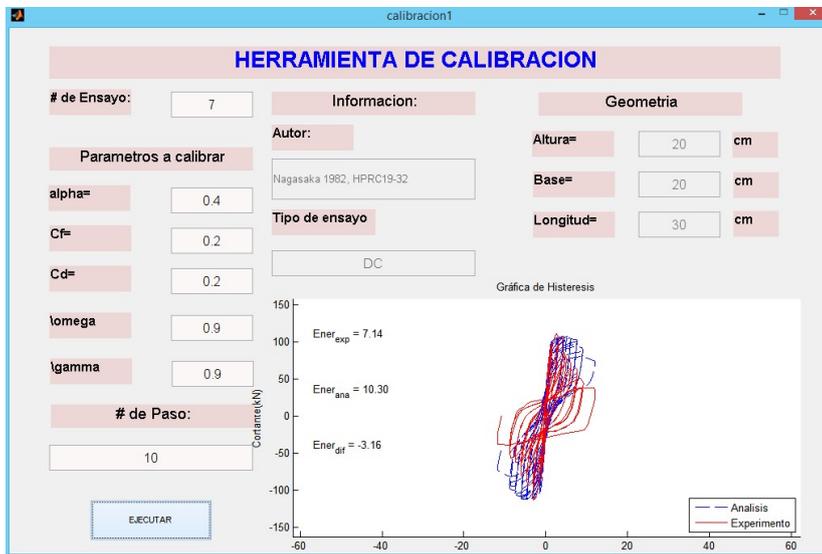
Después de Calibrar



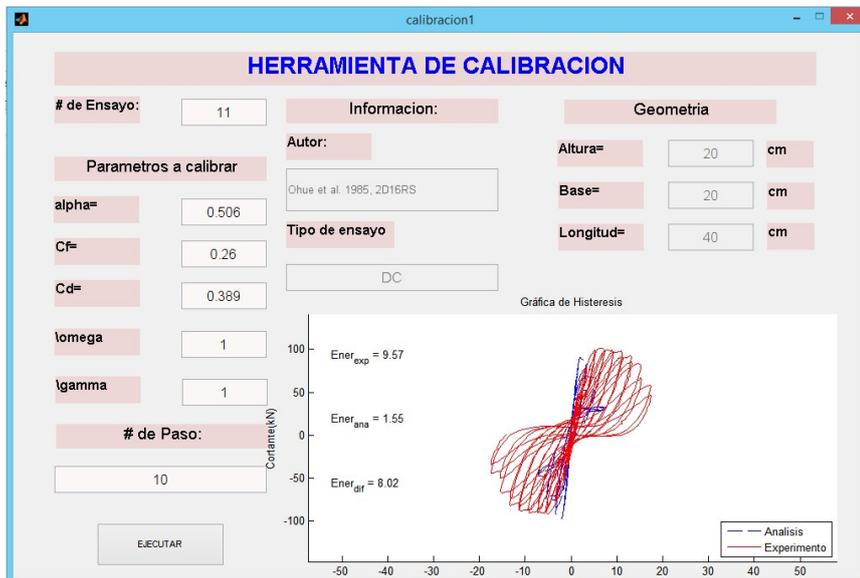
Antes de Calibrar



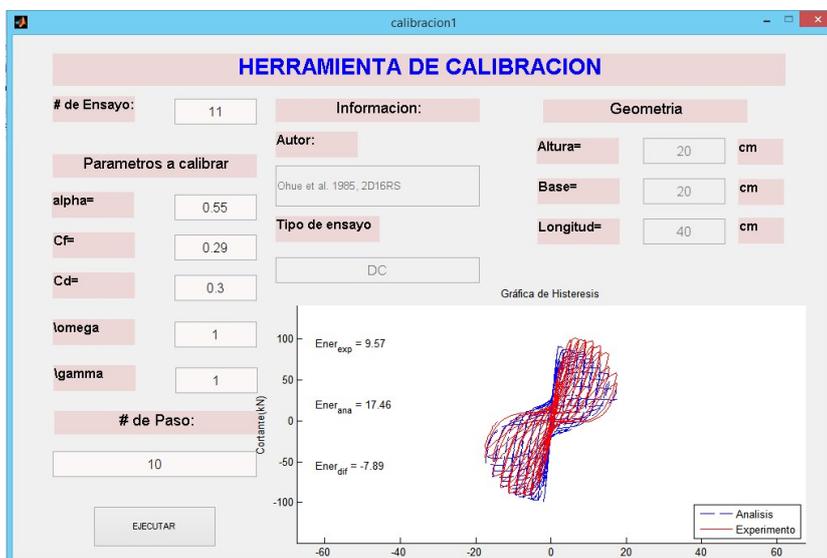
Después de Calibrar



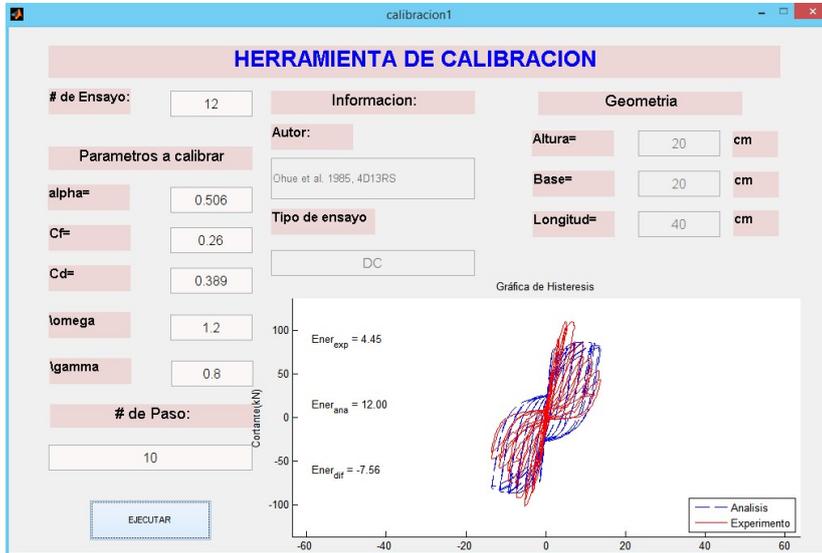
Antes de Calibrar



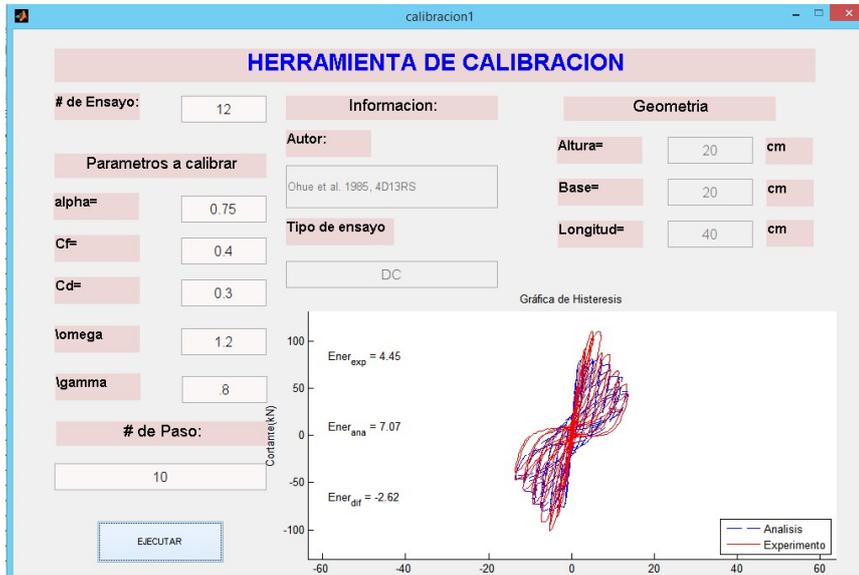
Después de Calibrar



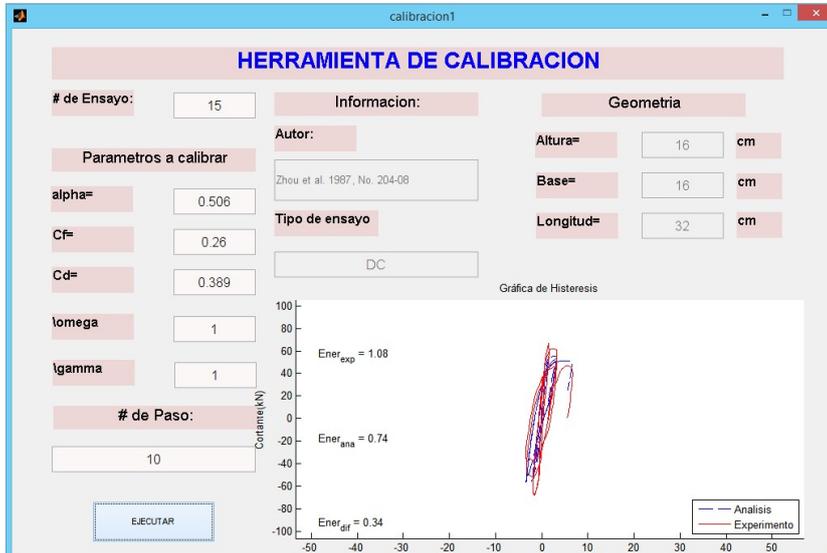
Antes de Calibrar



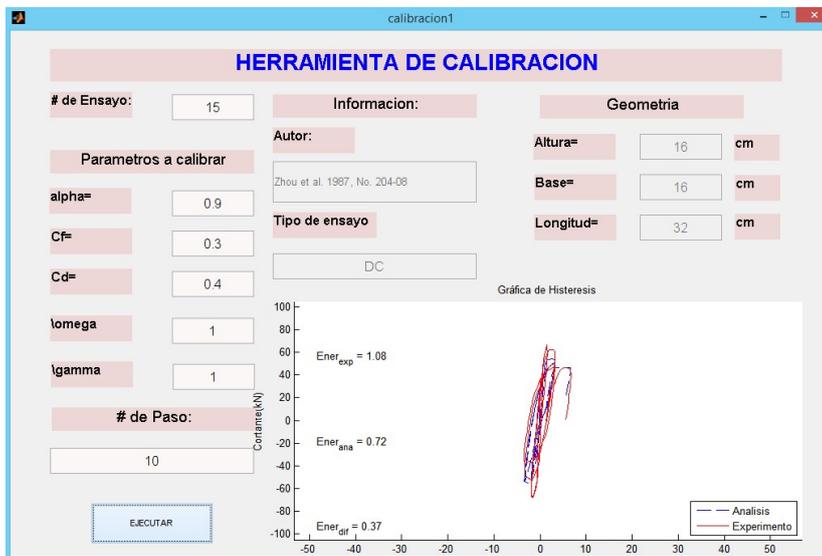
Después de Calibrar



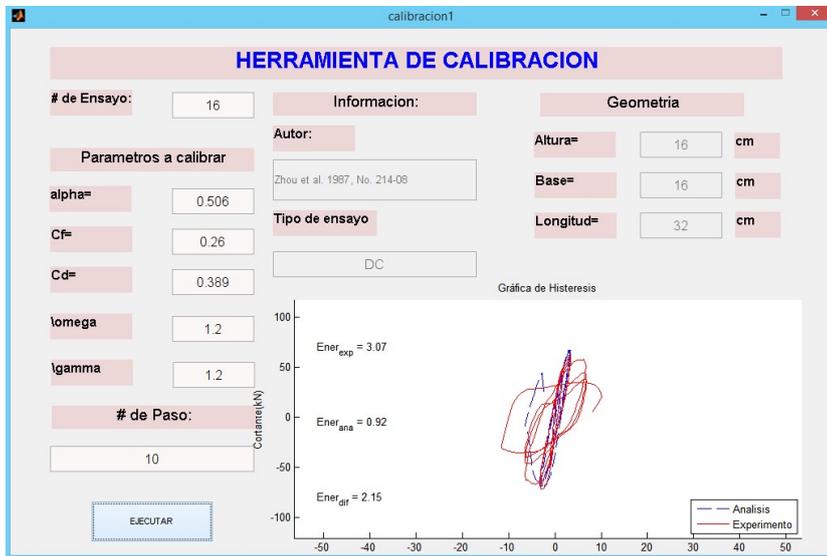
Antes de Calibrar



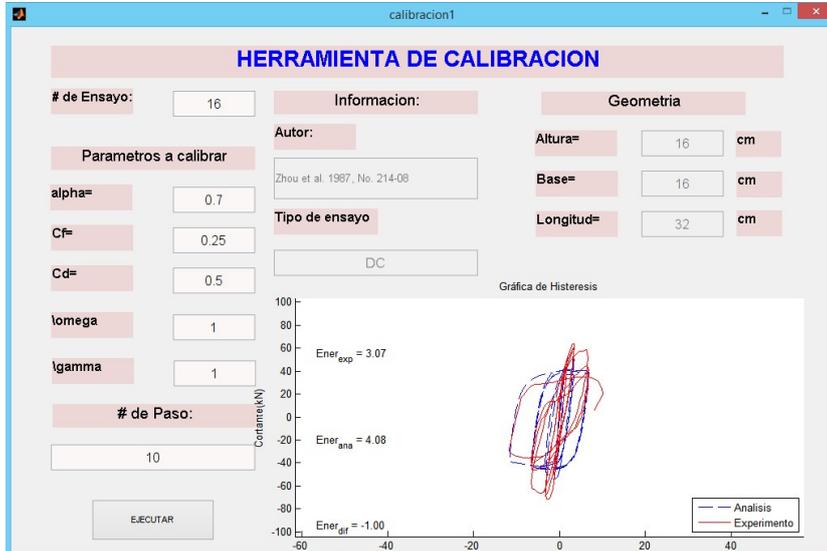
Después de Calibrar



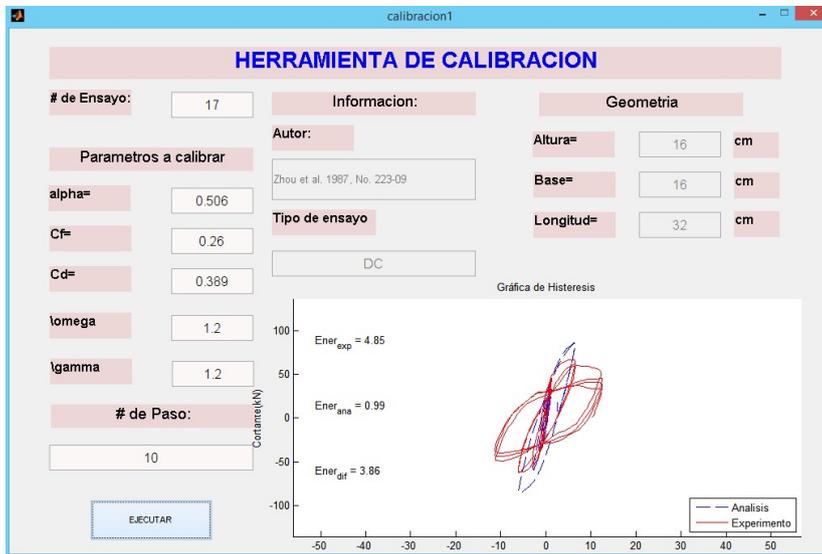
Antes de Calibrar



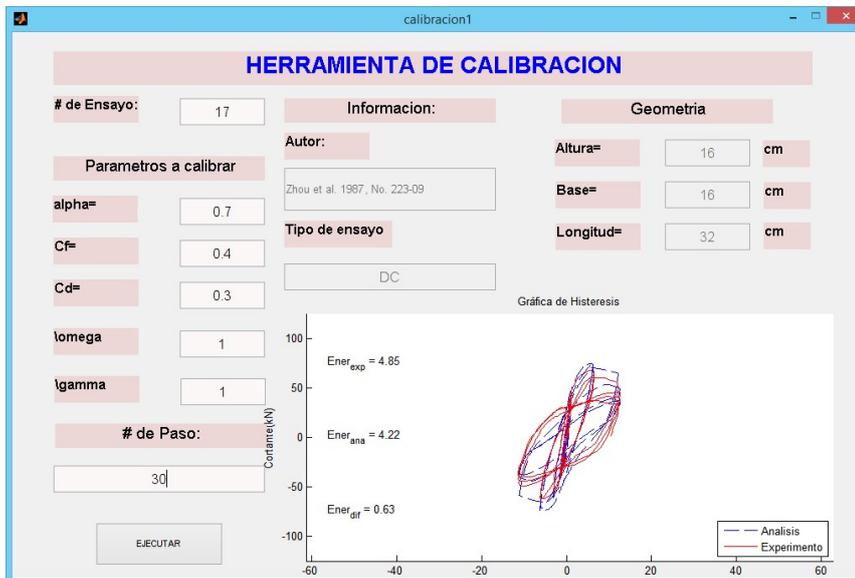
Después de Calibrar



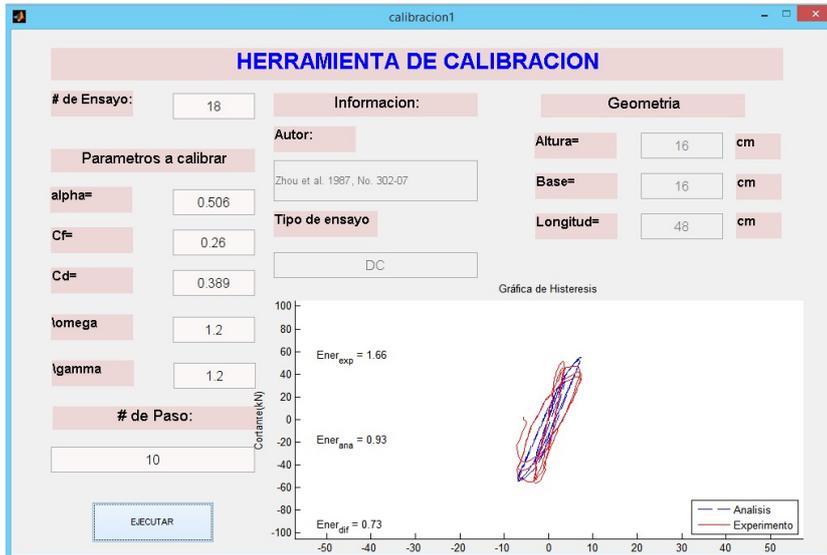
Antes de Calibrar



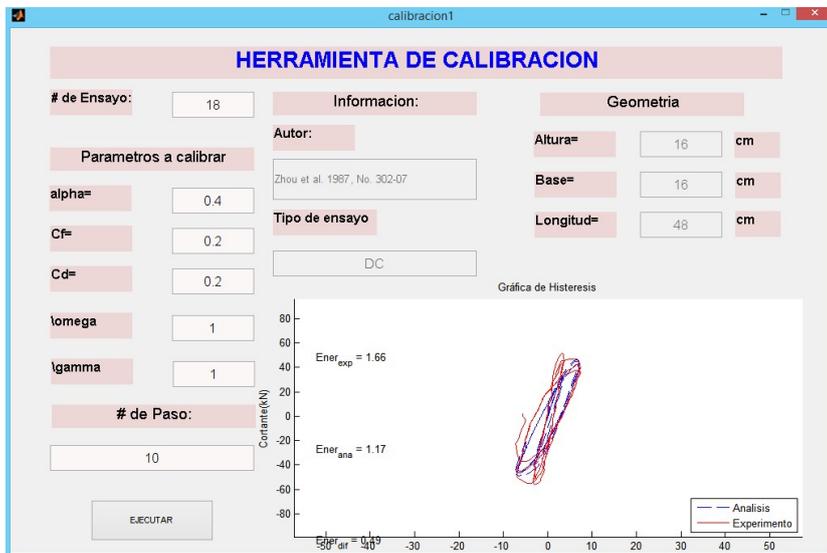
Después de Calibrar



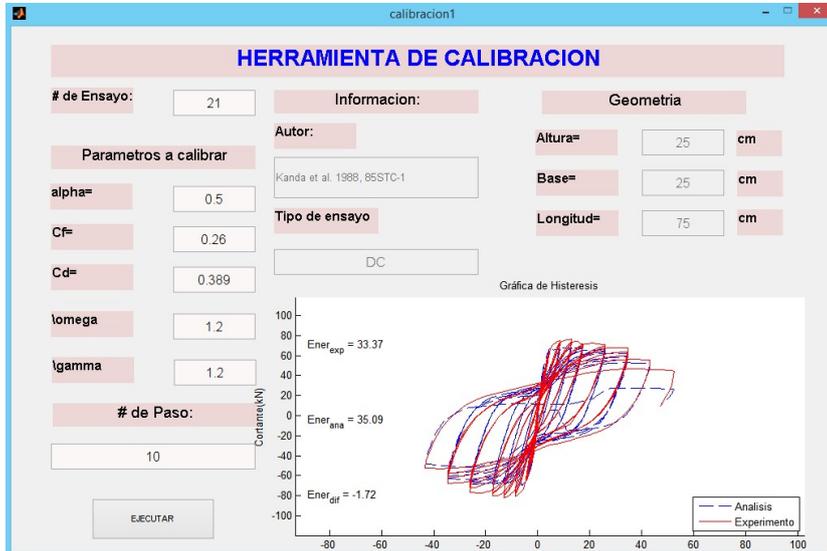
Antes de Calibrar



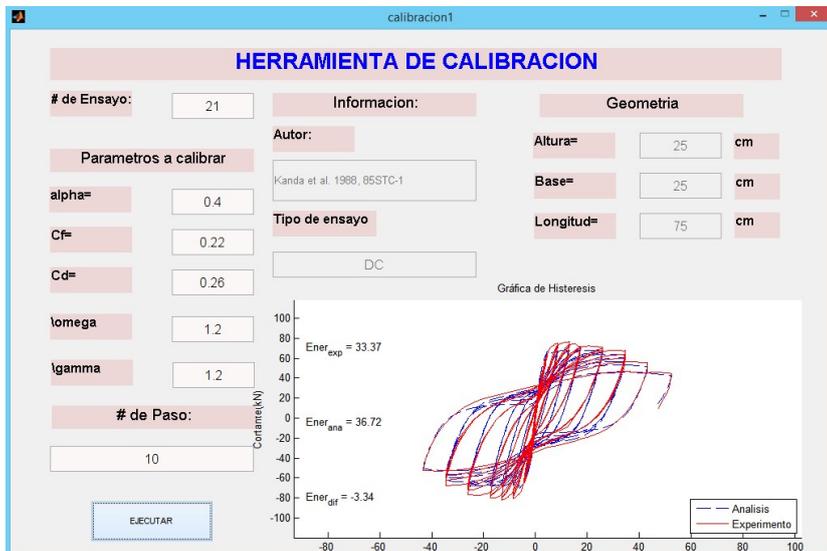
Después de Calibrar



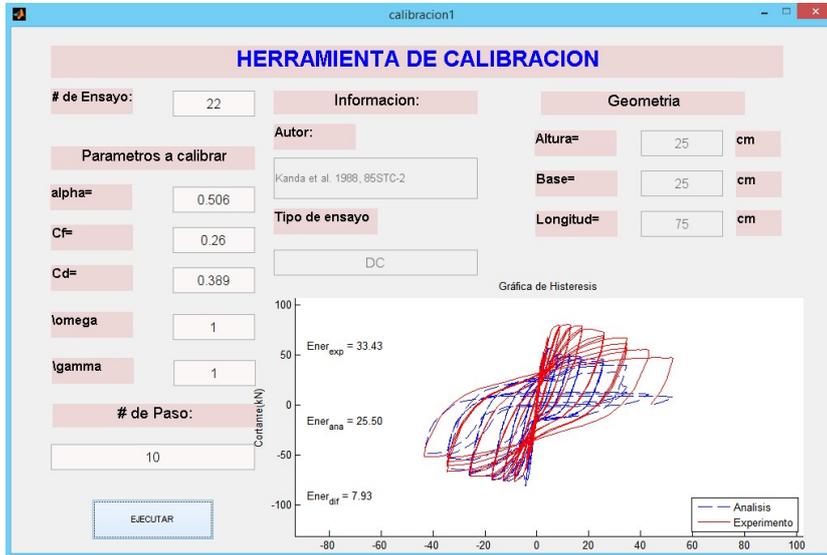
Antes de Calibrar



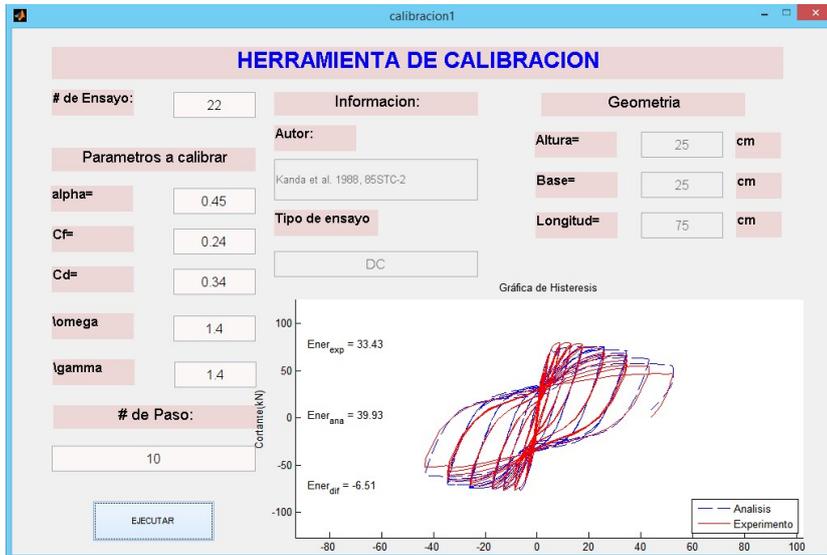
Después de Calibrar



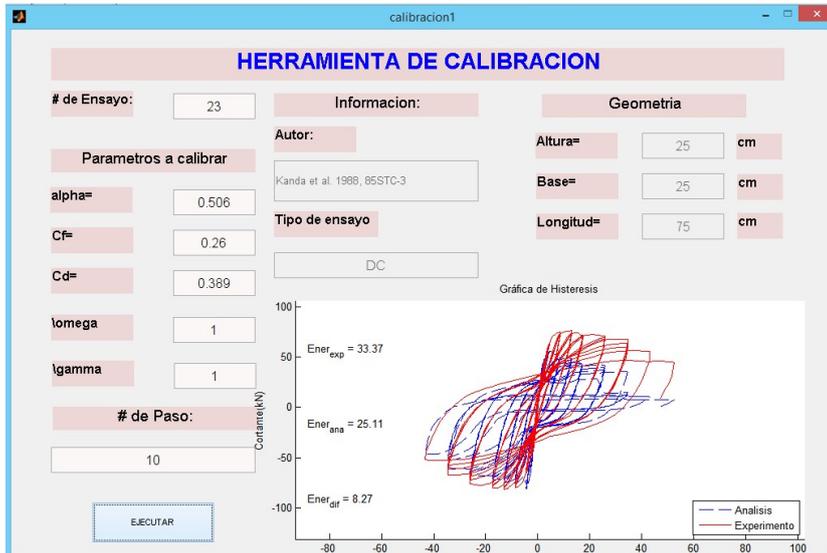
Antes de Calibrar



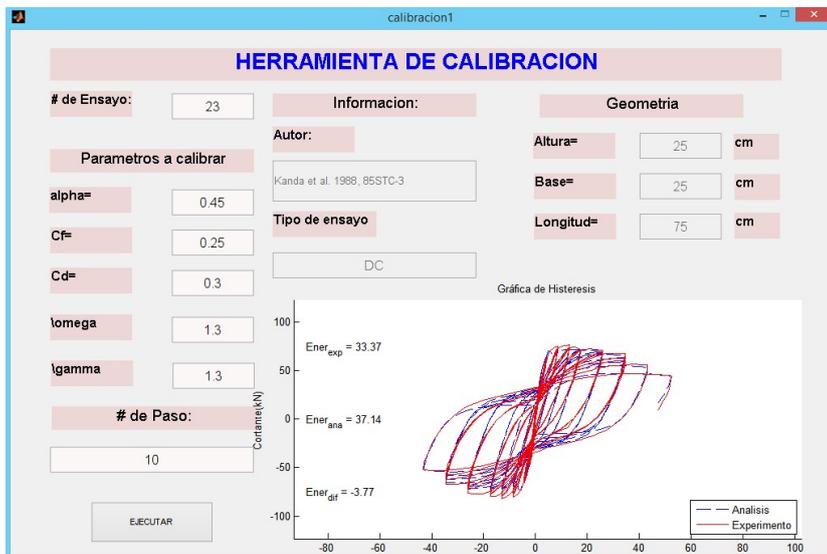
Después de Calibrar



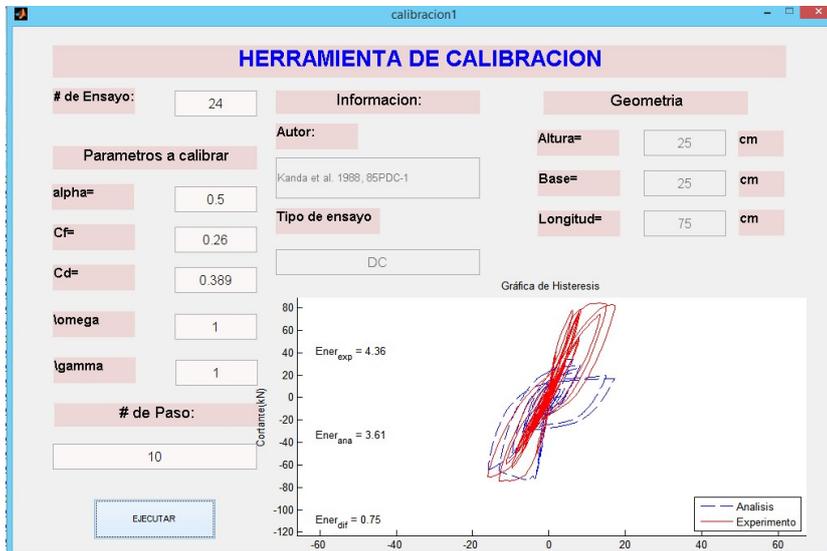
Antes de Calibrar



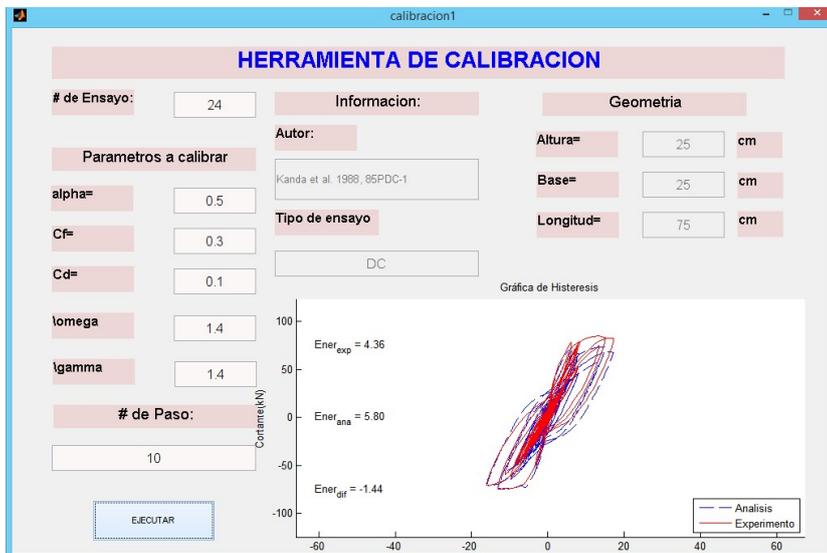
Después de Calibrar



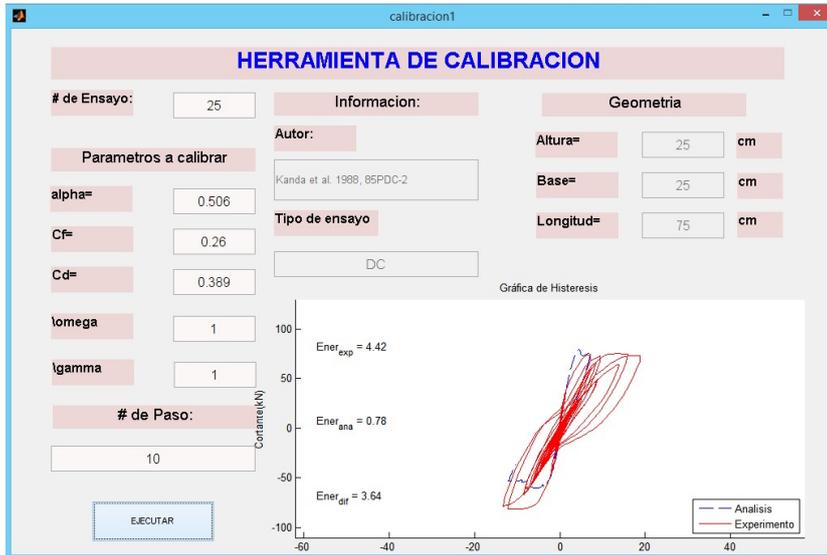
Antes de Calibrar



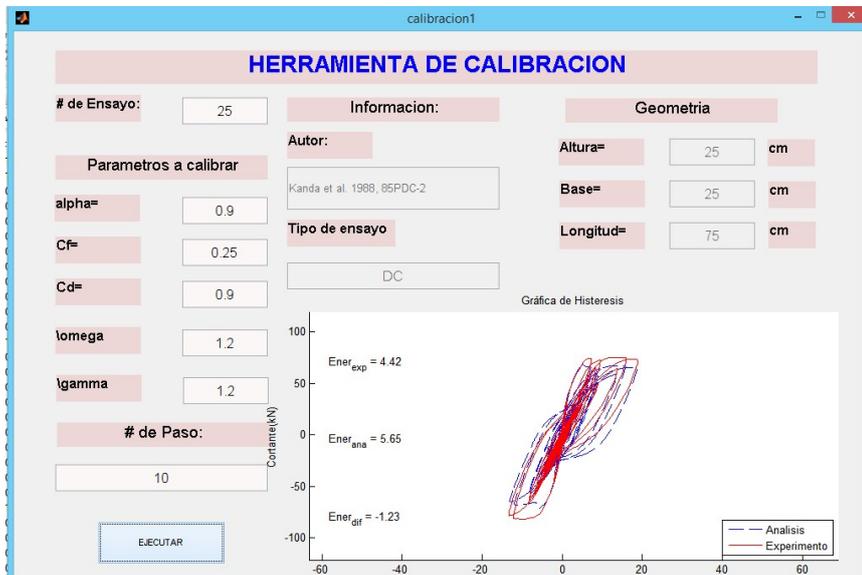
Después de Calibrar



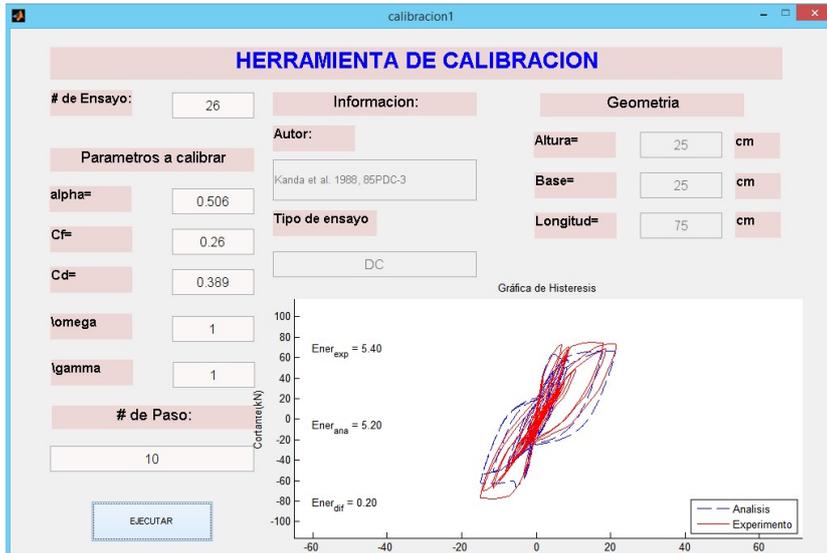
Antes de Calibrar



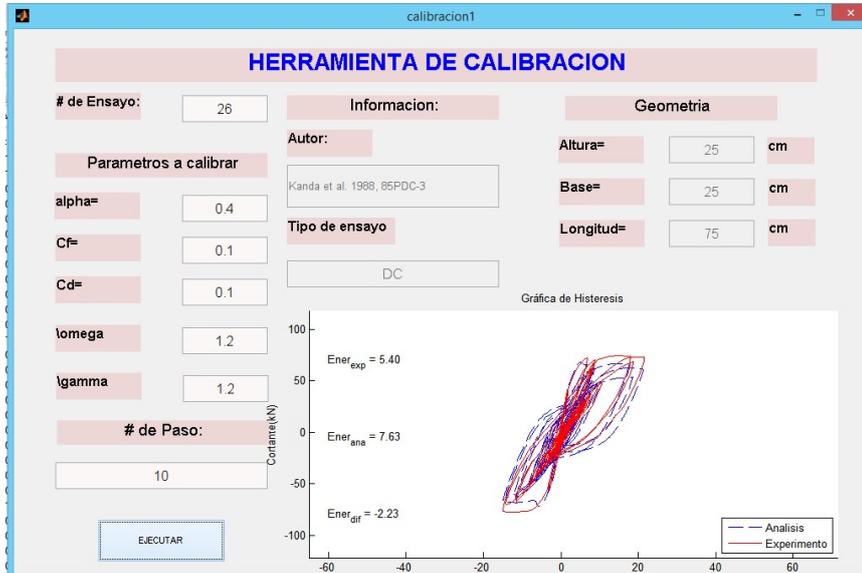
Después de Calibrar



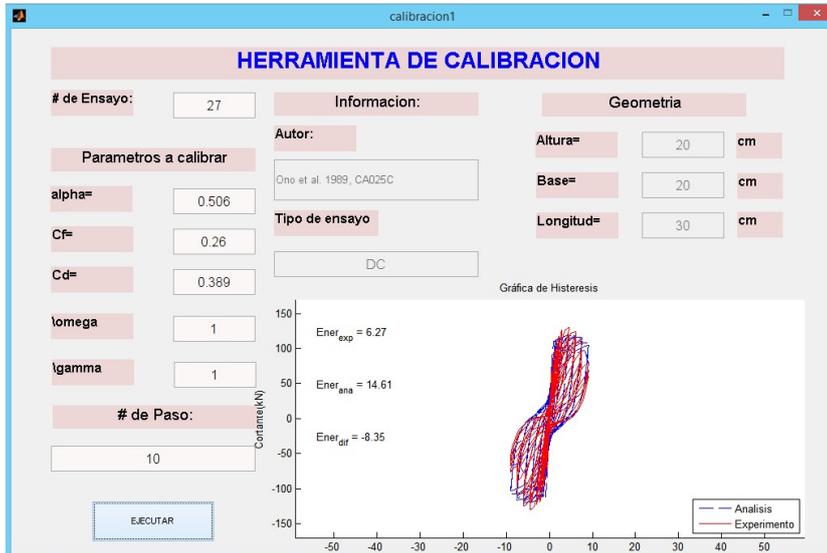
Antes de Calibrar



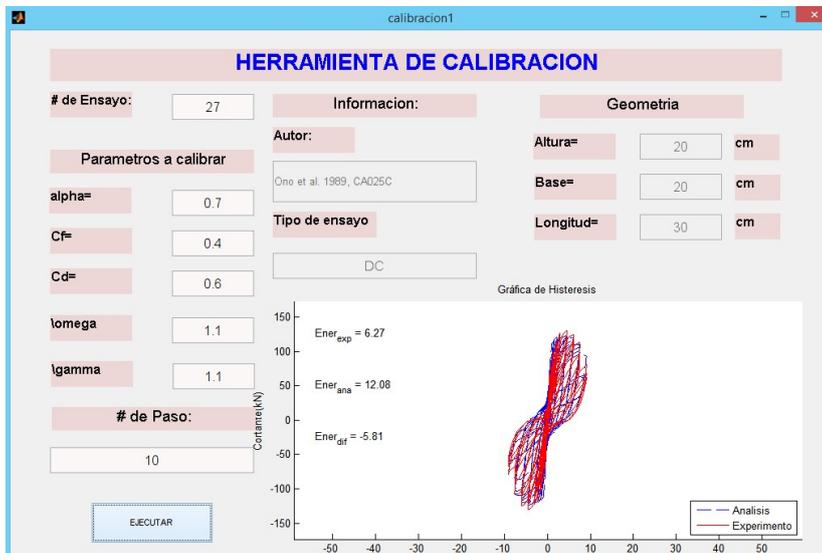
Después de Calibrar



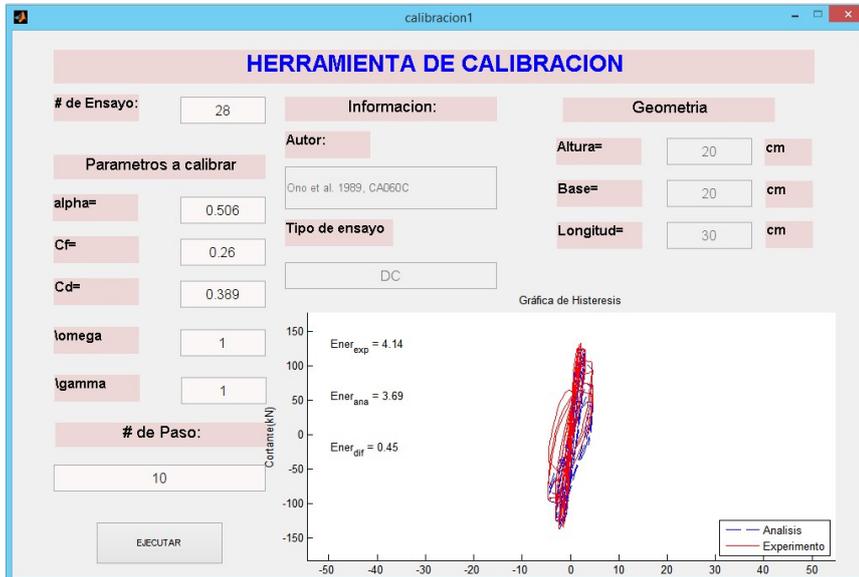
Antes de Calibrar



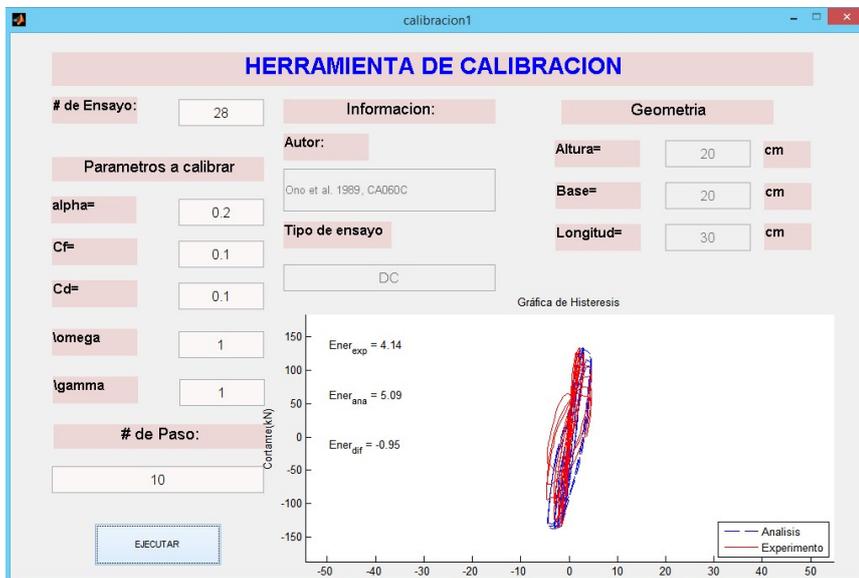
Después de Calibrar



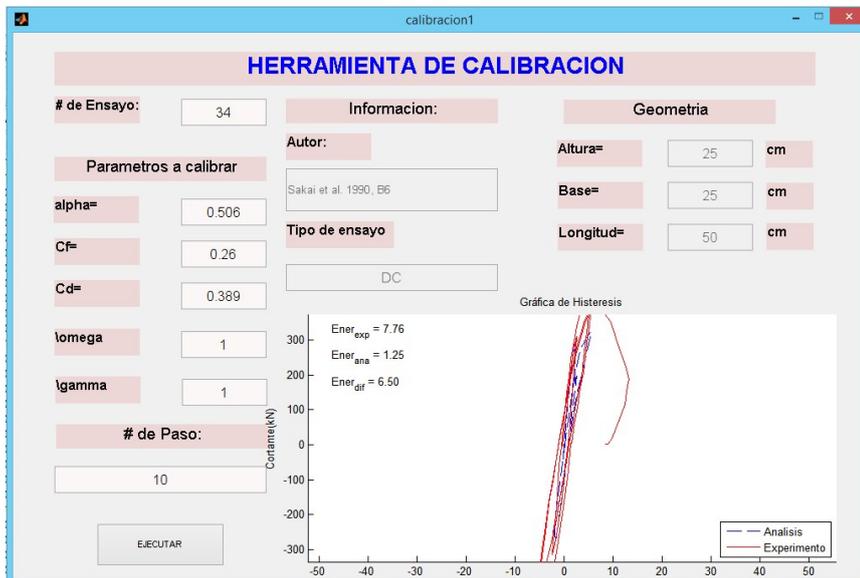
Antes de Calibrar



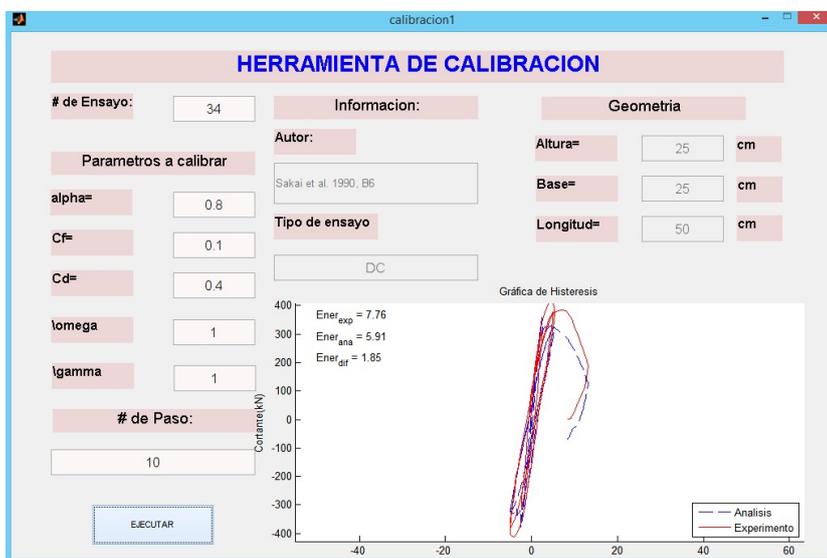
Después de Calibrar



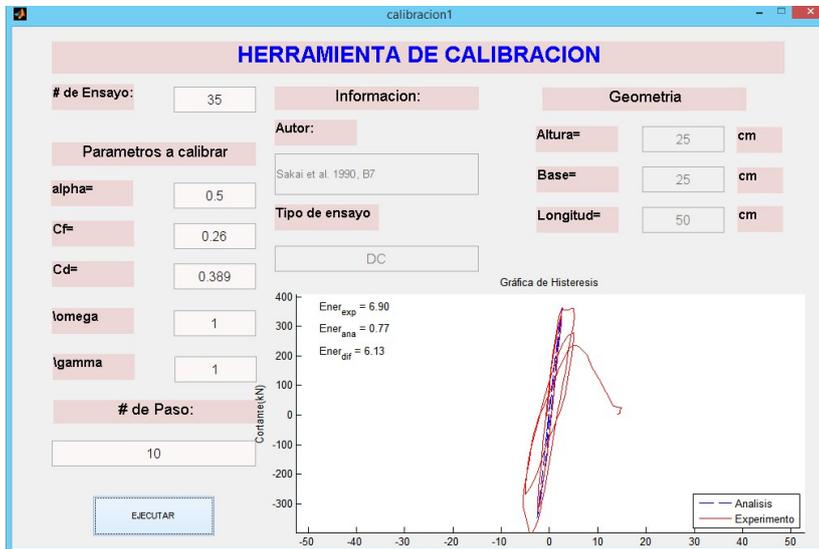
Antes de Calibrar



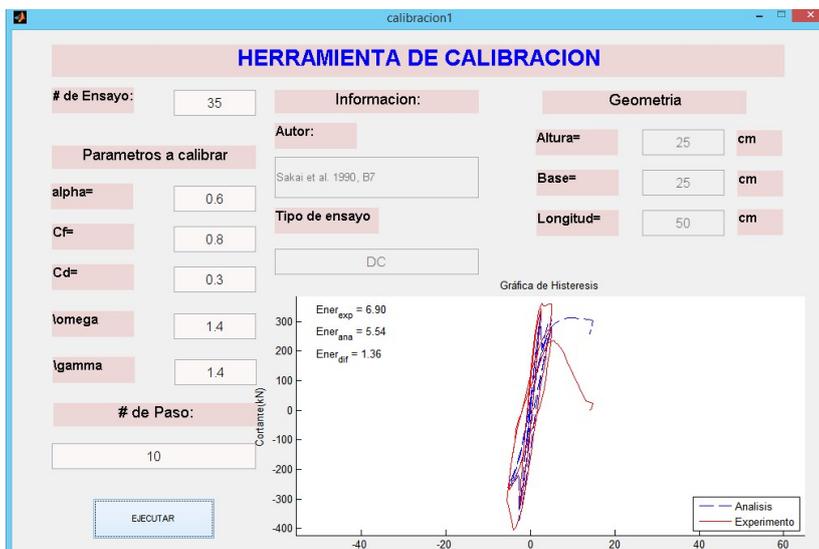
Después de Calibrar



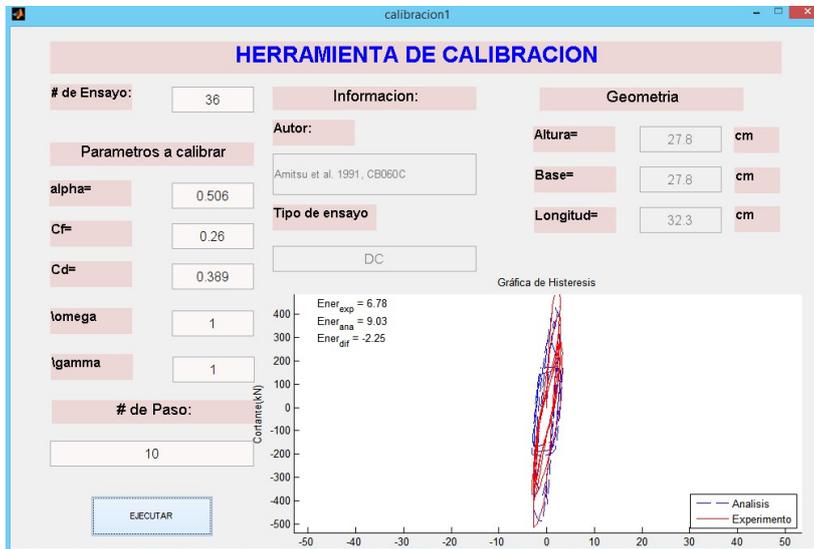
Antes de Calibrar



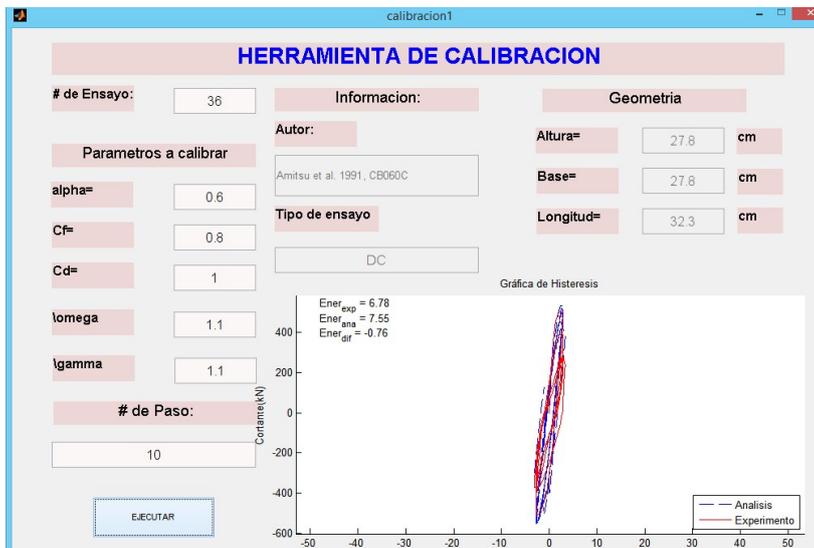
Después de Calibrar



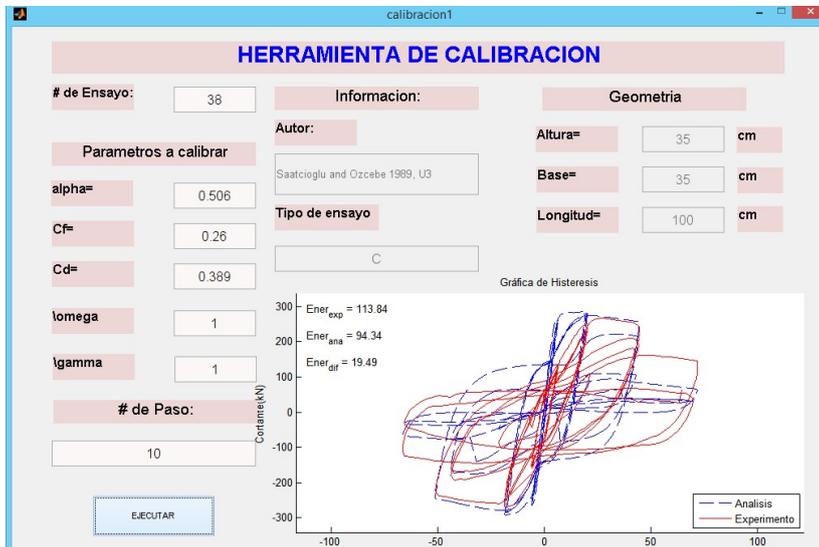
Antes de Calibrar



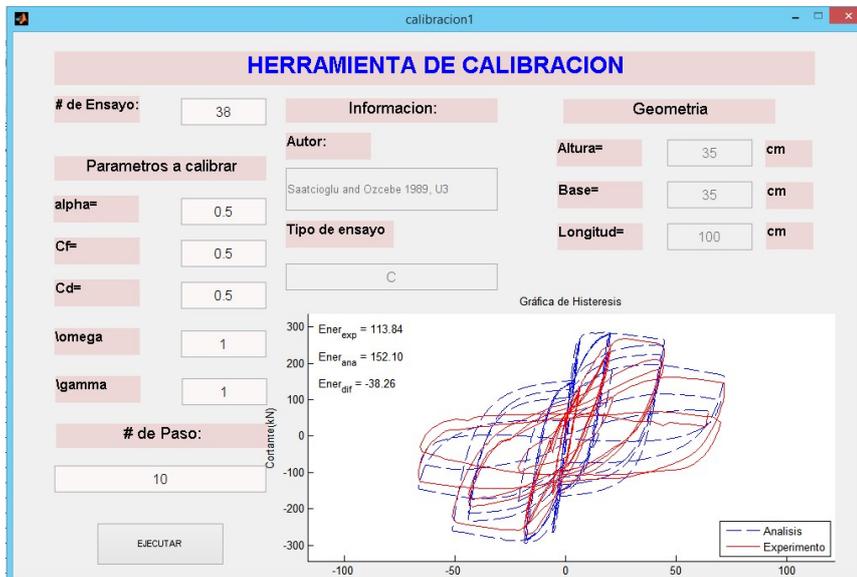
Después de Calibrar



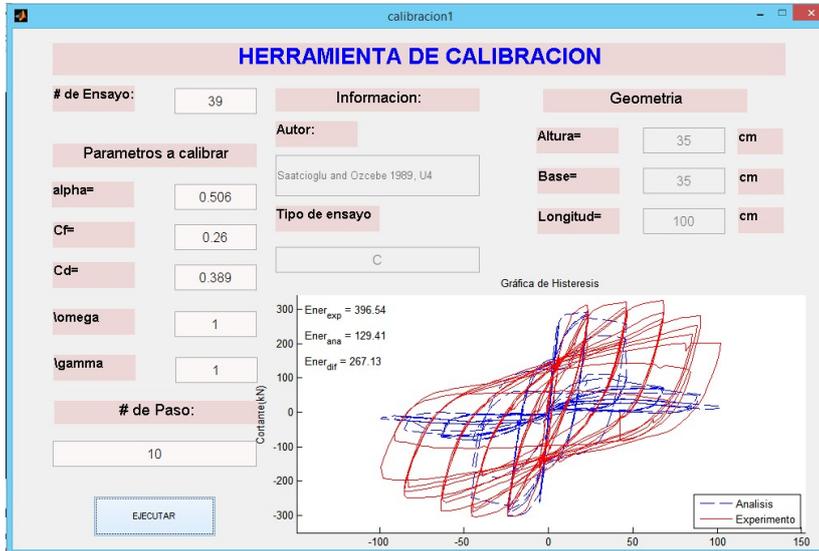
Antes de Calibrar



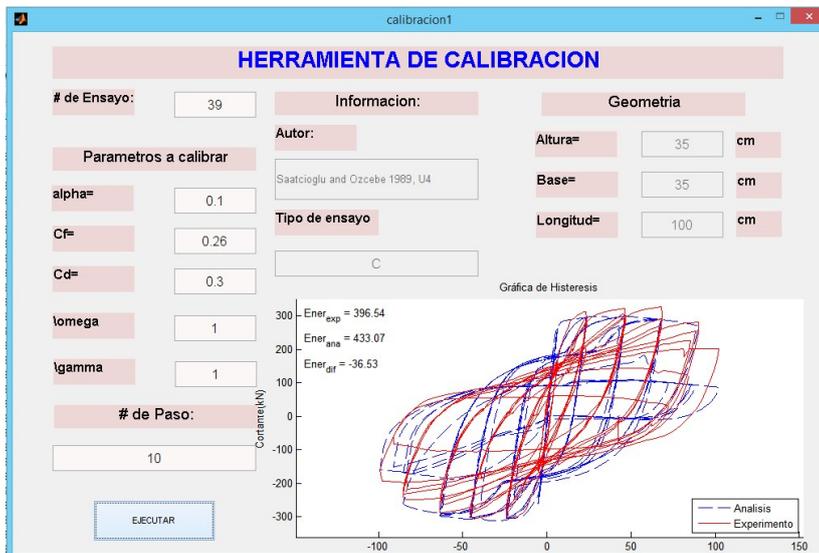
Después de Calibrar



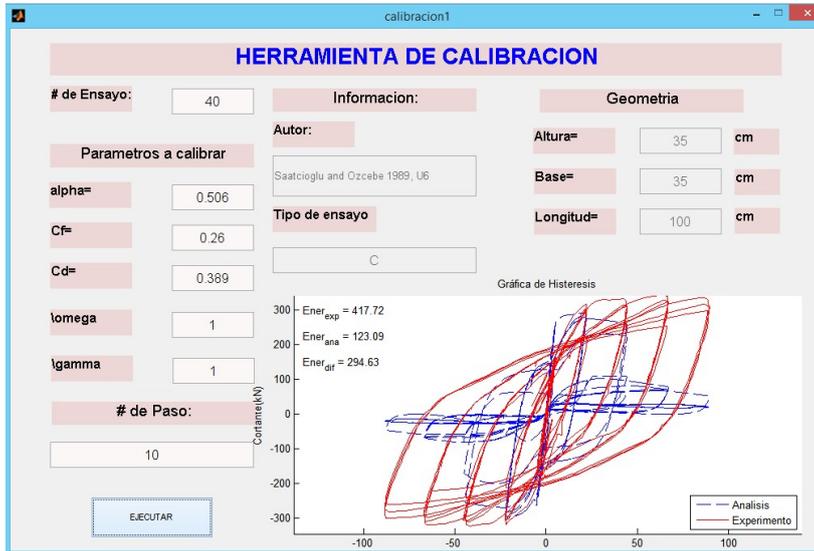
Antes de Calibrar



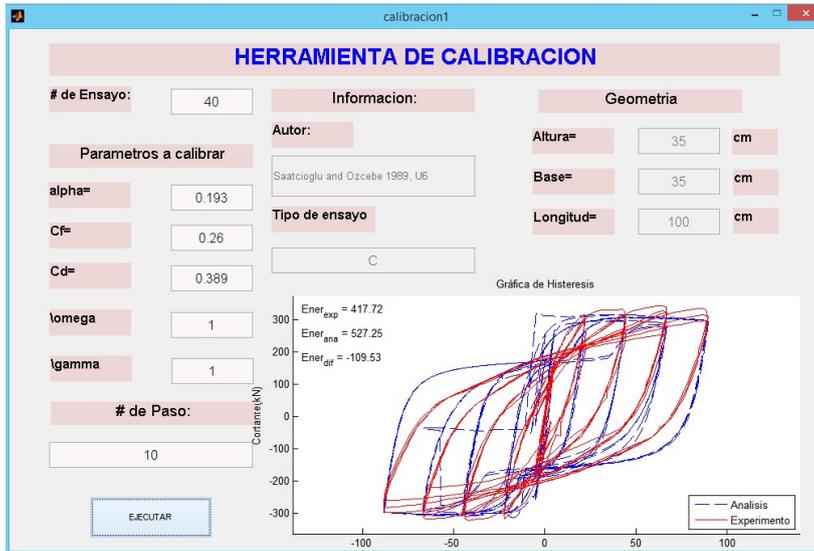
Después de Calibrar



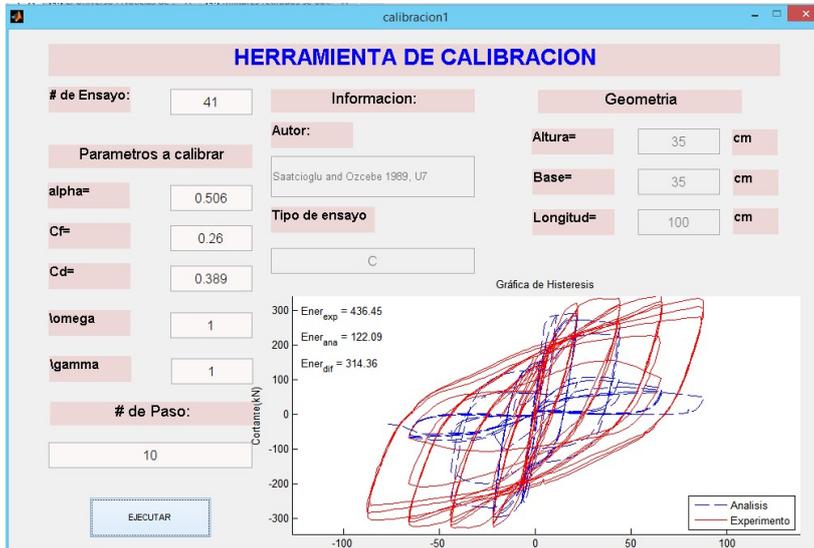
Antes de Calibrar



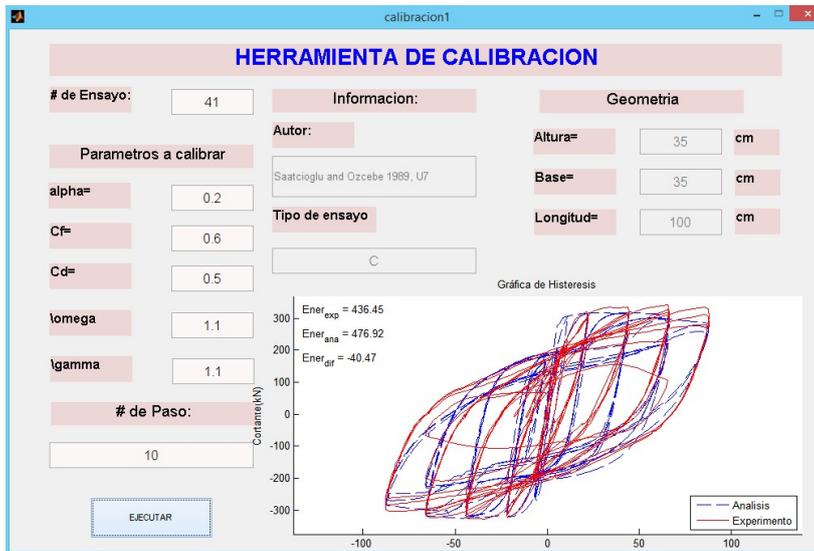
Después de Calibrar



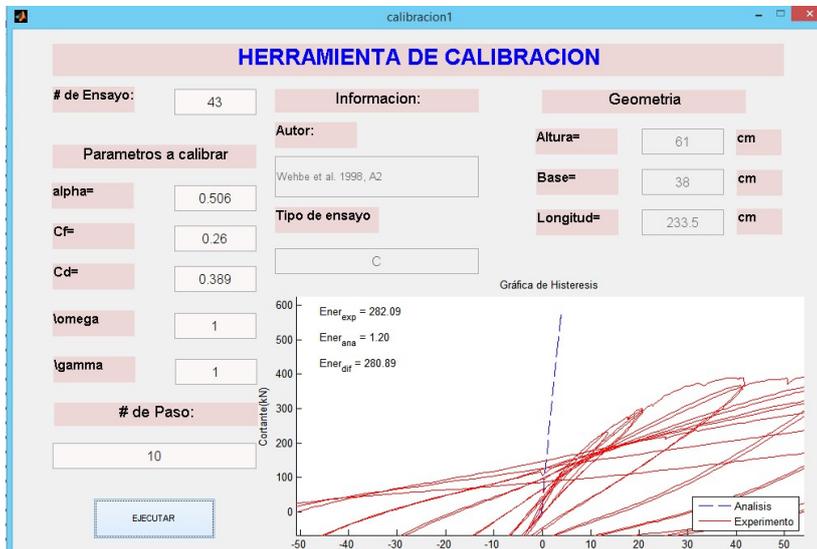
Antes de Calibrar



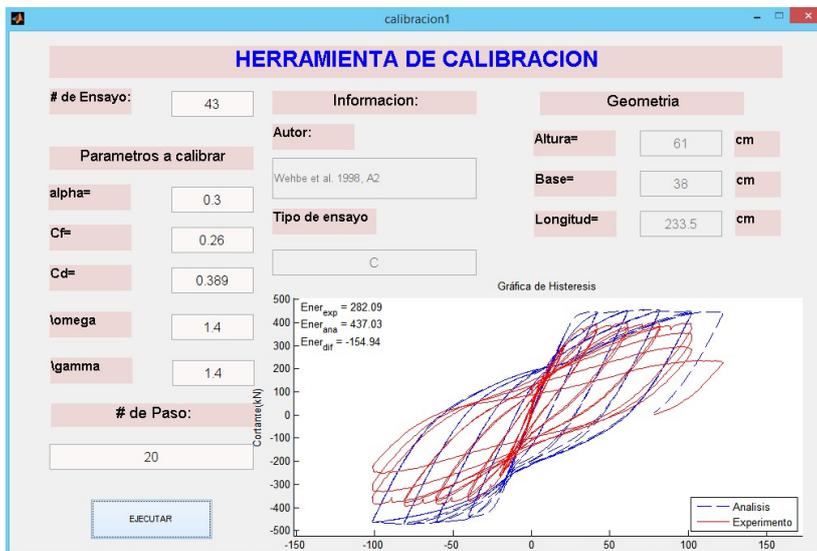
Después de Calibrar



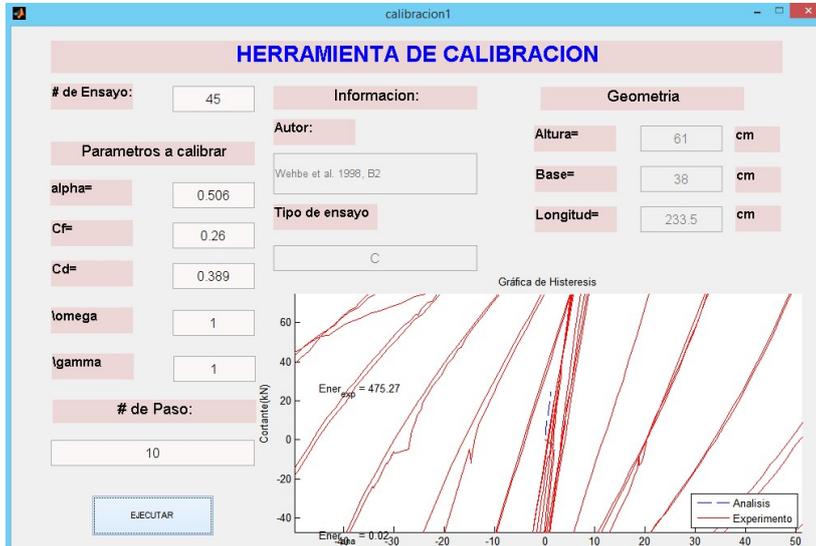
Antes de Calibrar



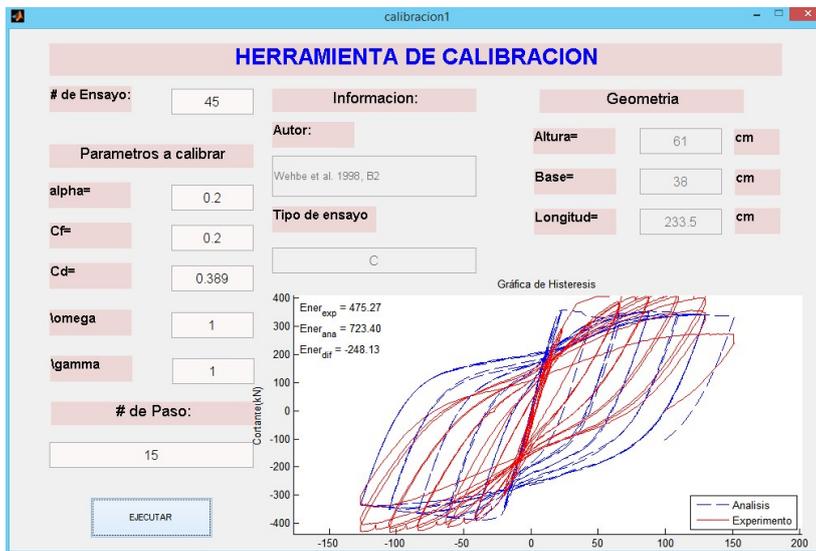
Después de Calibrar



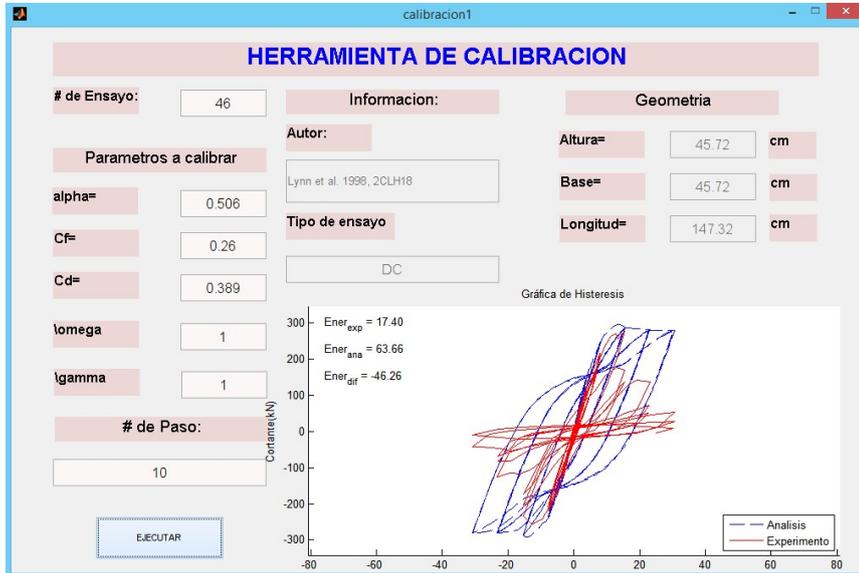
Antes de Calibrar



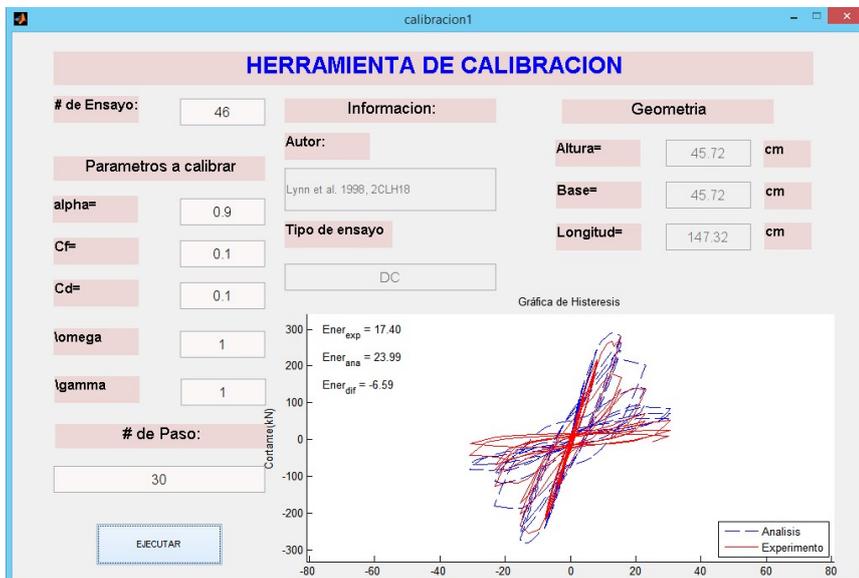
Después de Calibrar



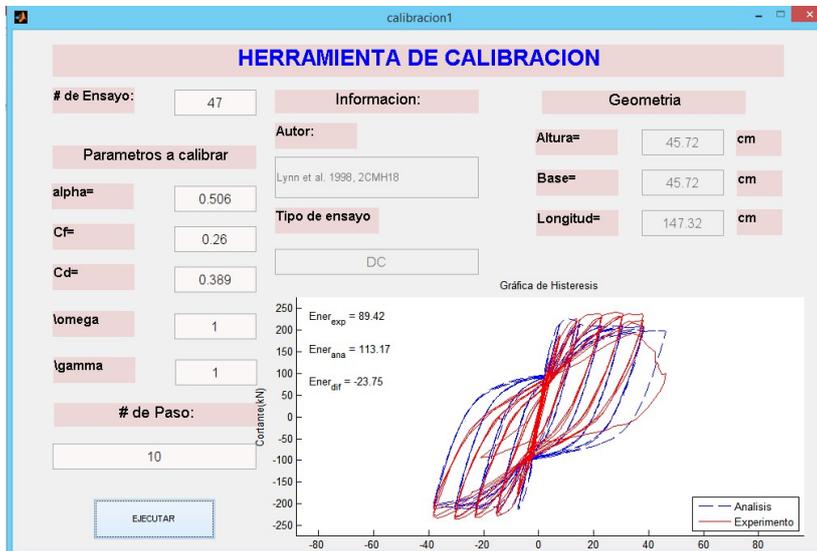
Antes de Calibrar



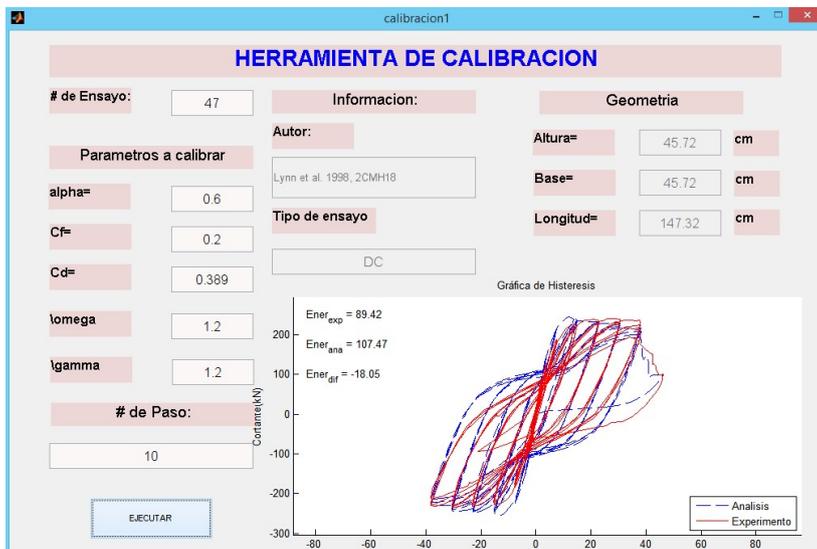
Después de Calibrar



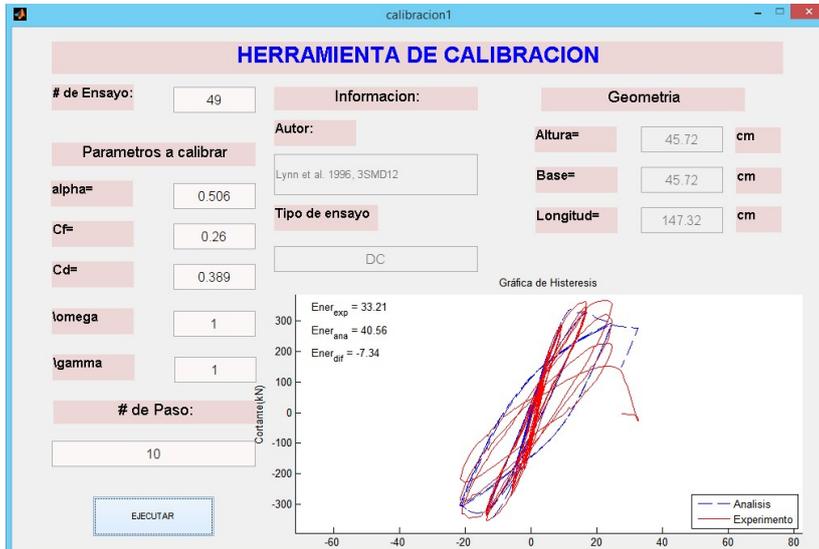
Antes de Calibrar



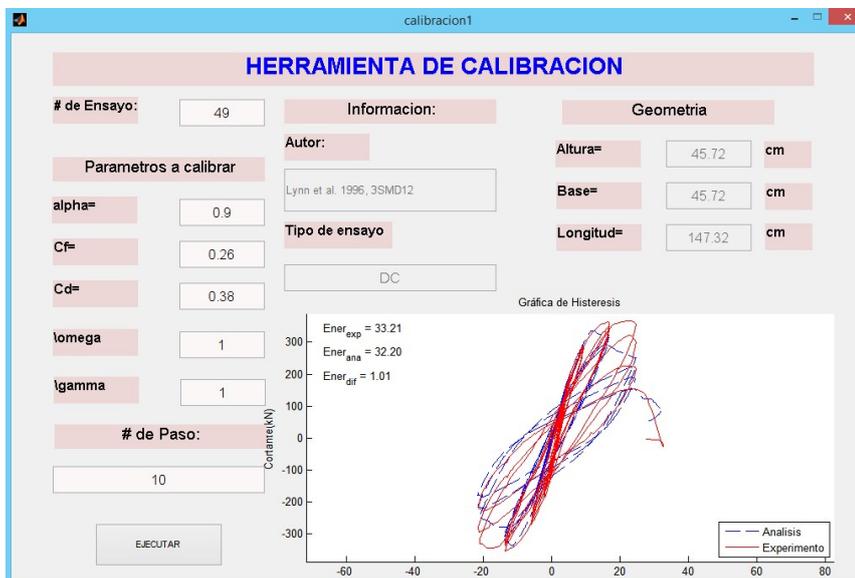
Después de Calibrar



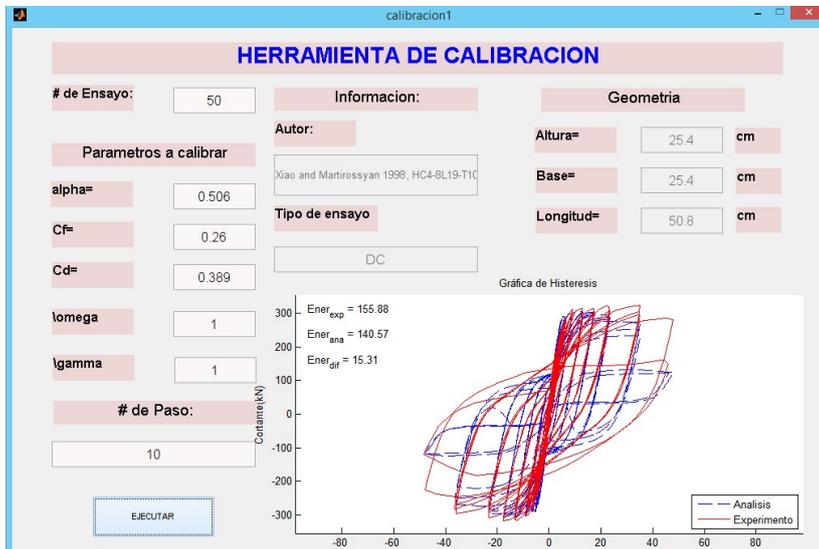
Antes de Calibrar



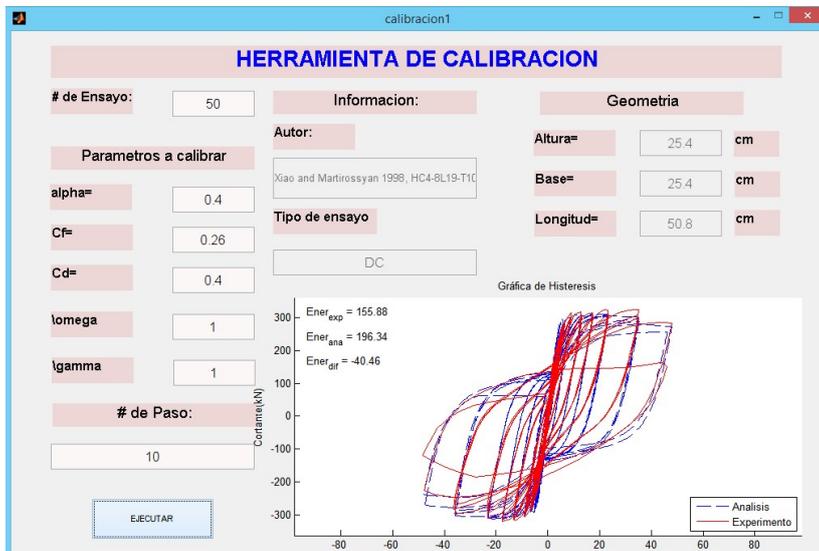
Después de Calibrar



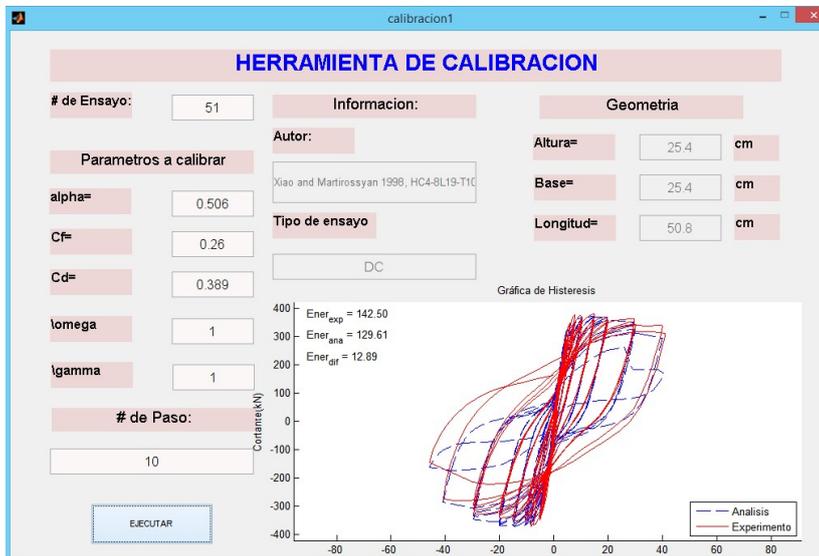
Antes de Calibrar



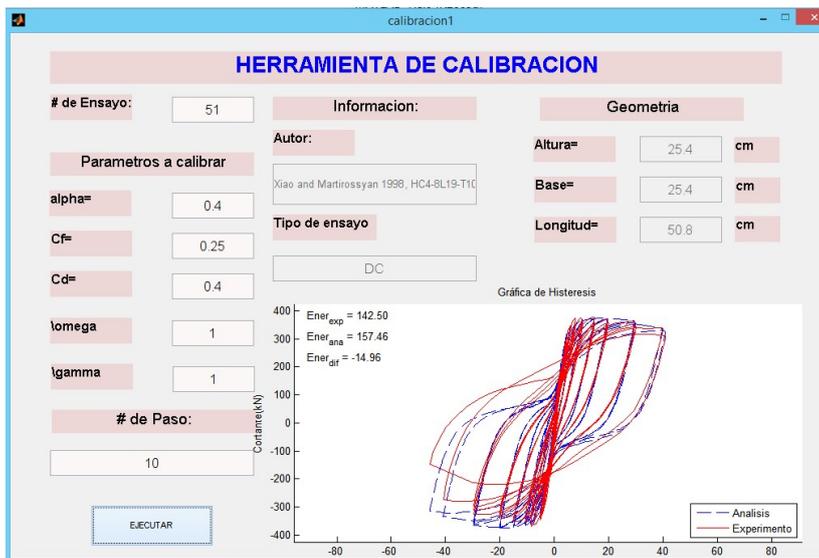
Después de Calibrar



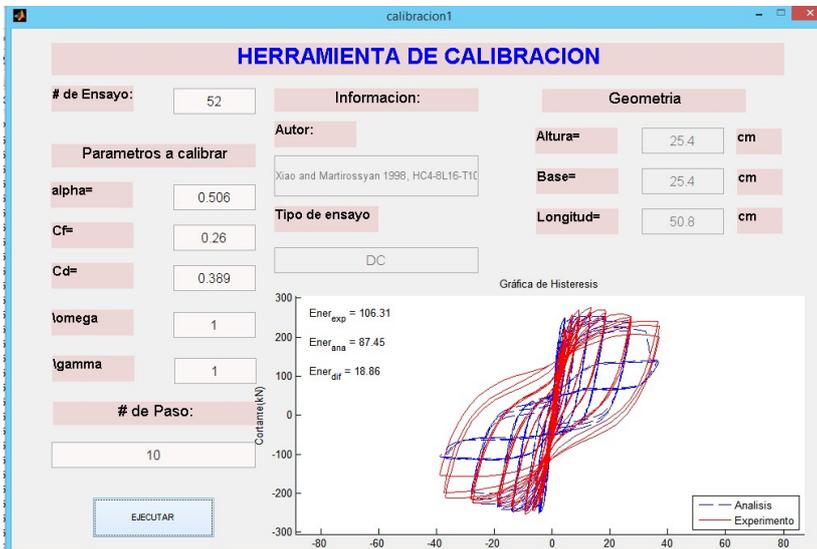
Antes de Calibrar



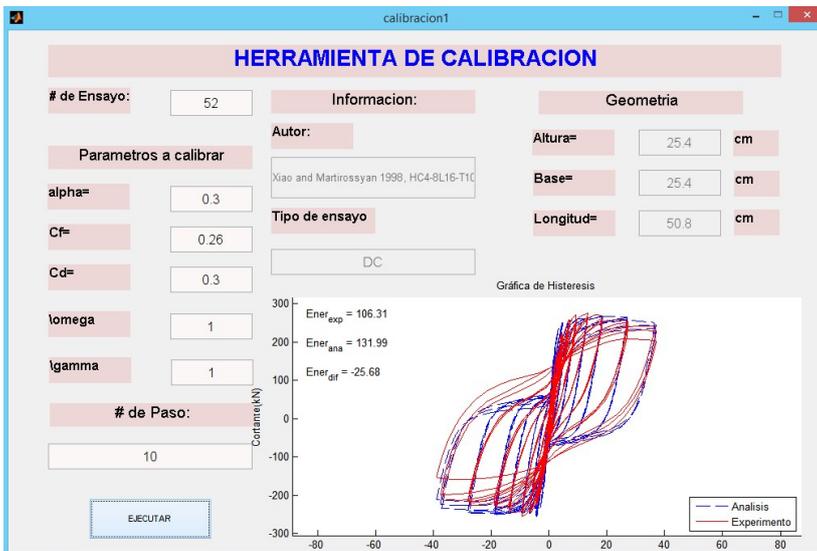
Después de Calibrar



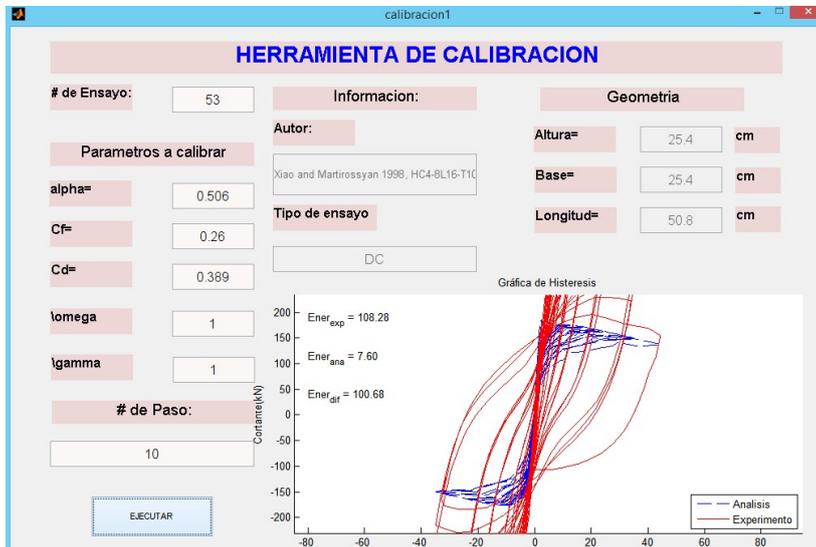
Antes de Calibrar



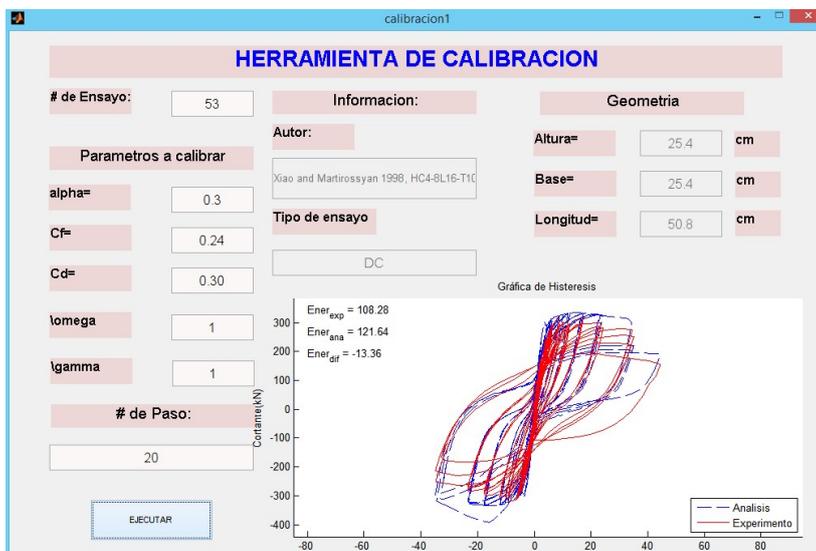
Después de Calibrar



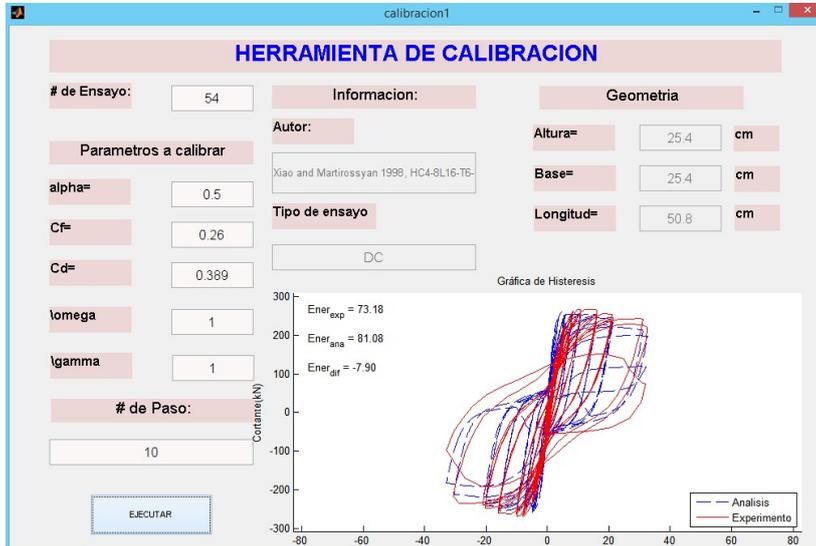
Antes de Calibrar



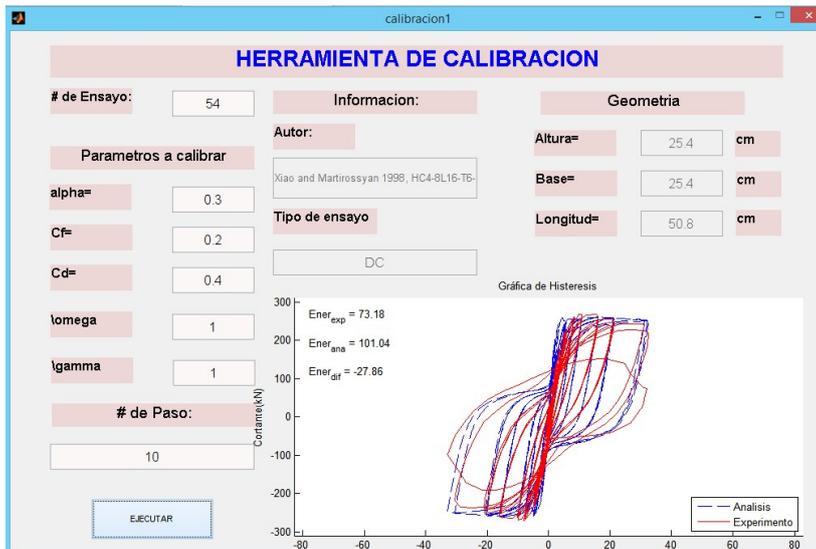
Después de Calibrar



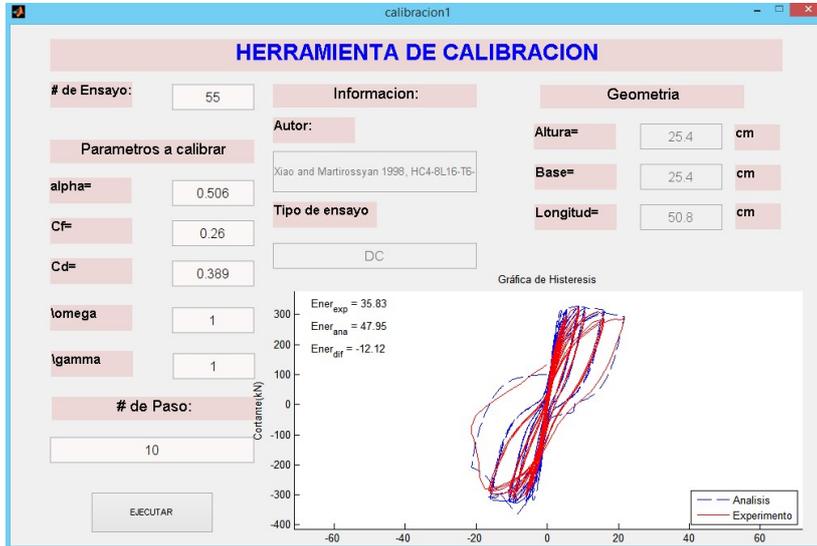
Antes de Calibrar



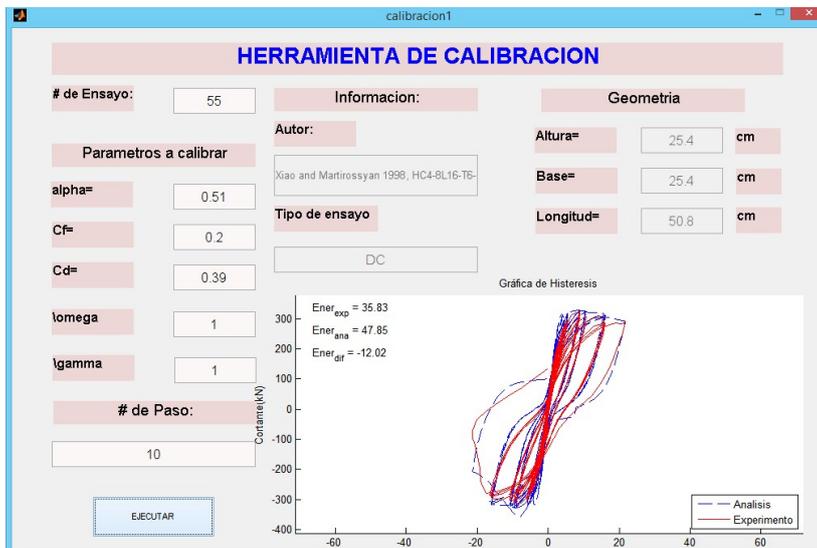
Después de Calibrar



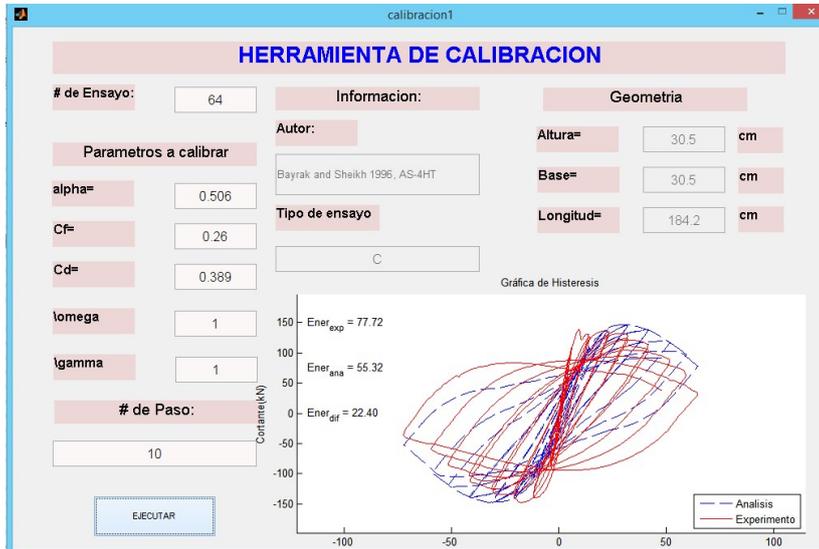
Antes de Calibrar



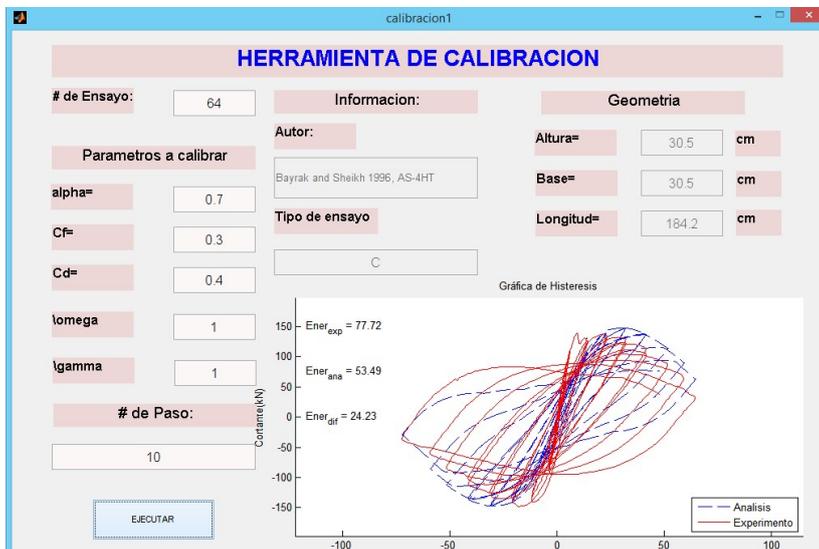
Después de Calibrar



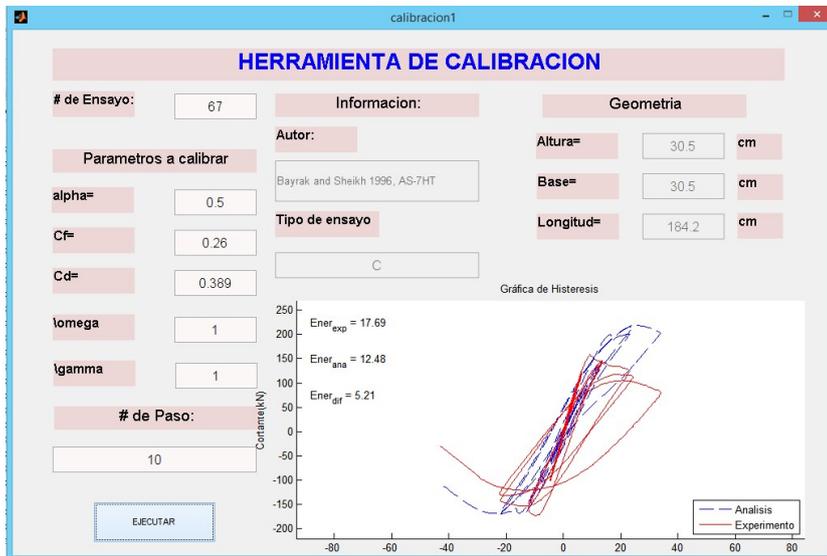
Antes de Calibrar



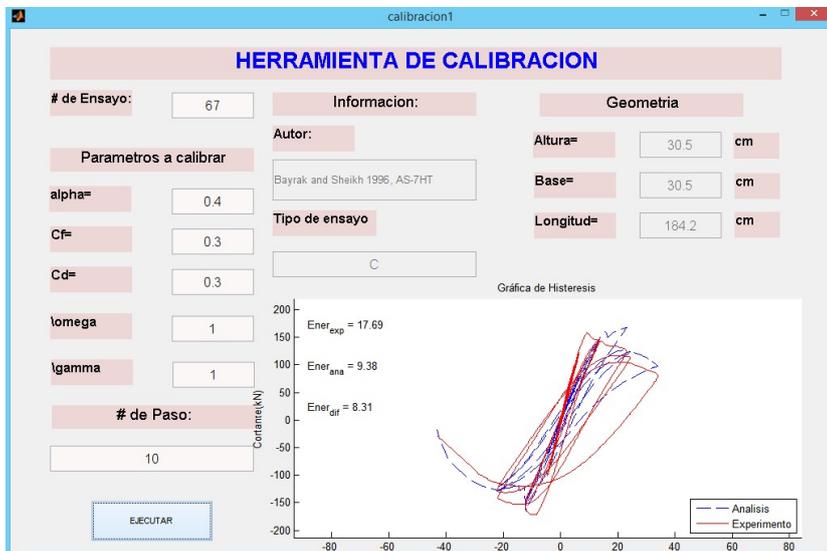
Después de Calibrar



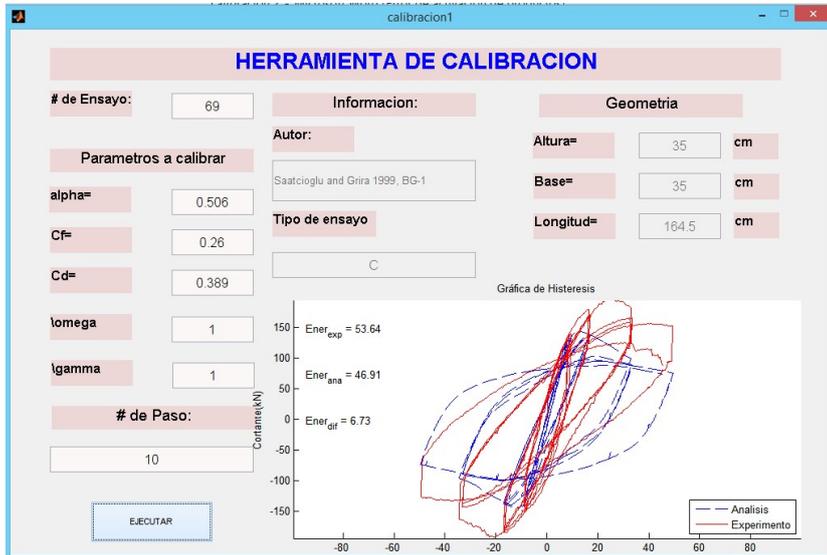
Antes de Calibrar



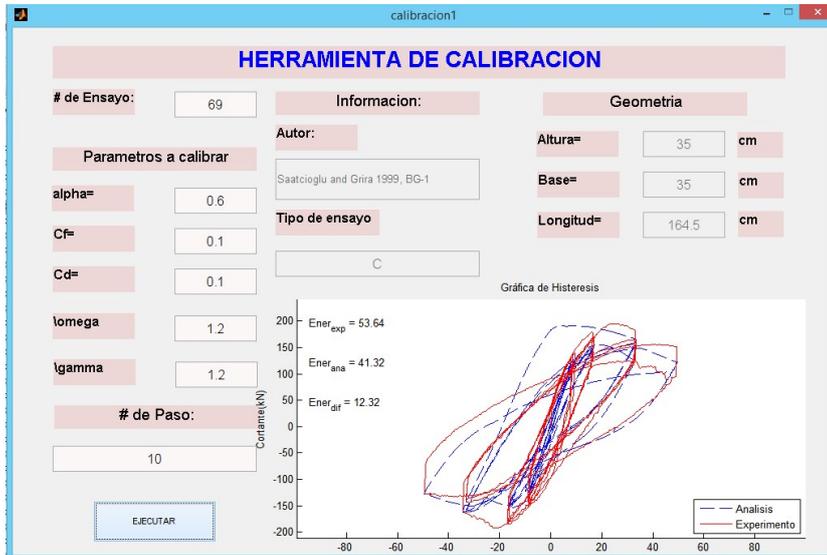
Después de Calibrar



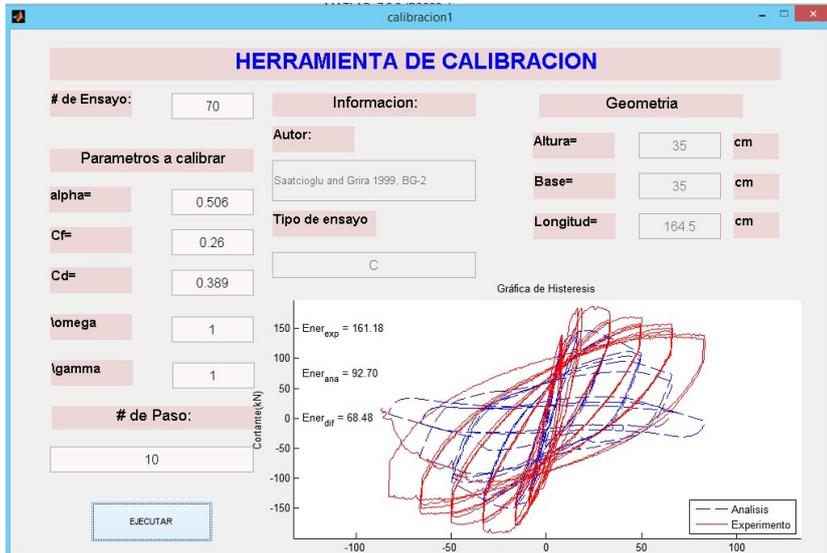
Antes de Calibrar



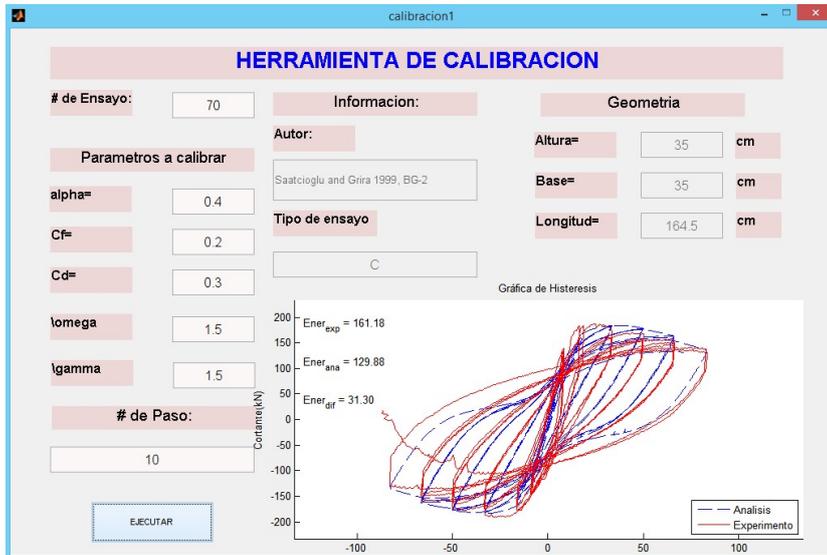
Después de Calibrar



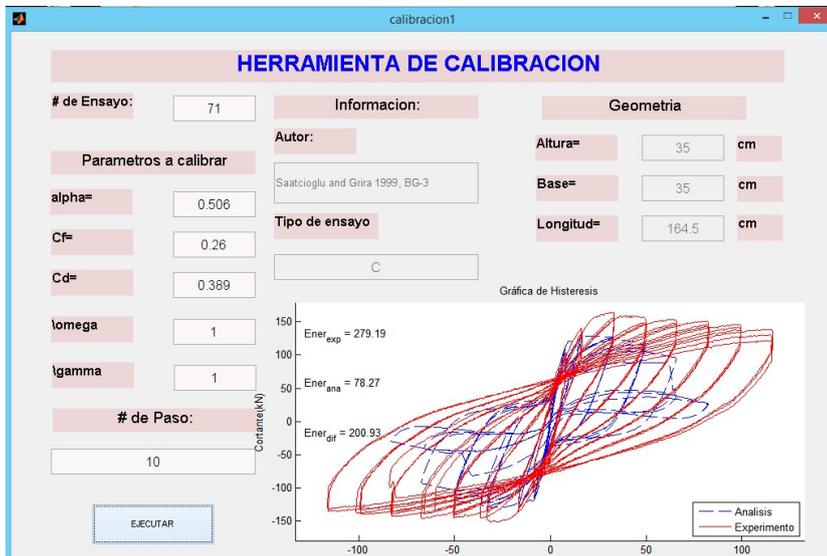
Antes de Calibrar



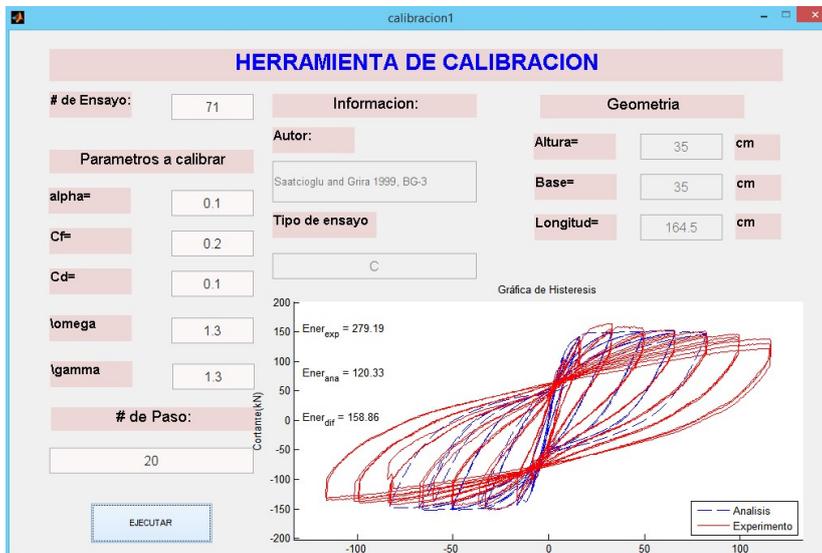
Después de Calibrar



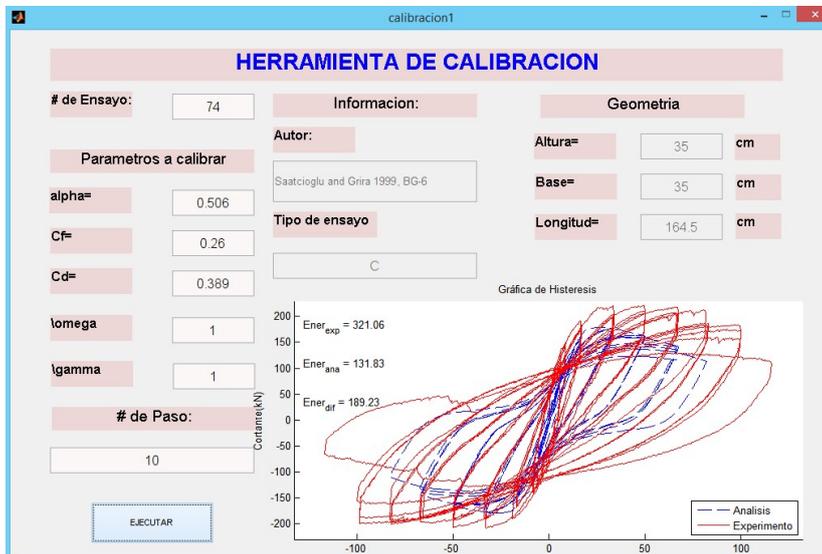
Antes de Calibrar



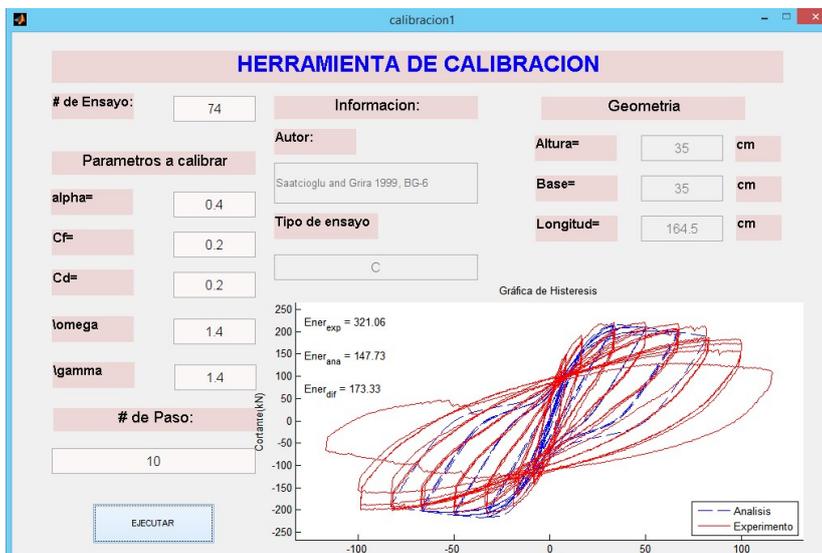
Después de Calibrar



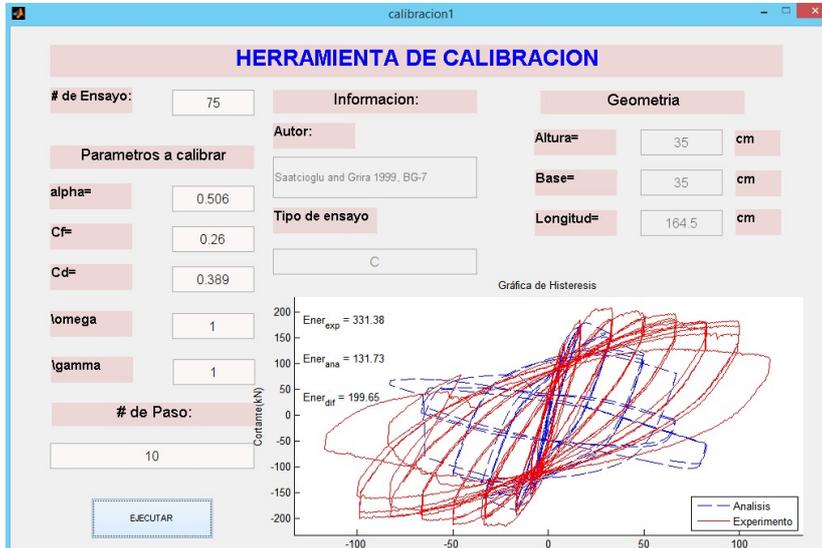
Antes de Calibrar



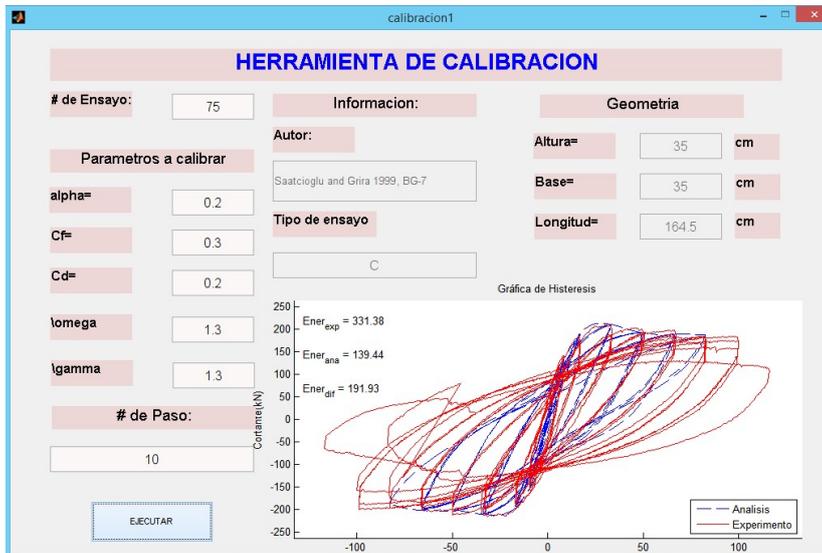
Después de Calibrar



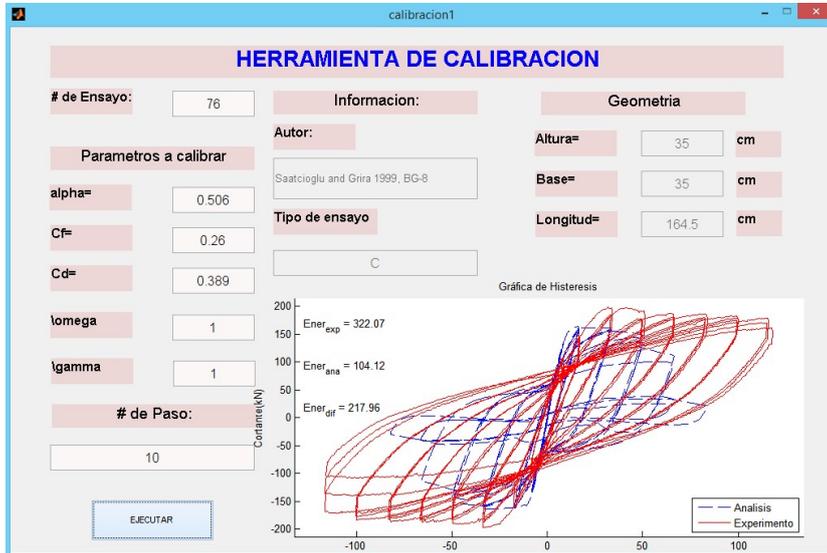
Antes de Calibrar



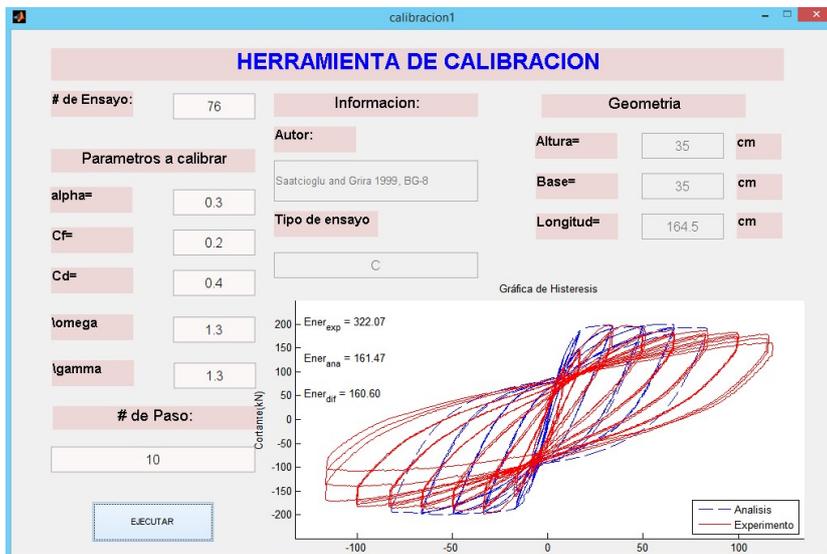
Después de Calibrar



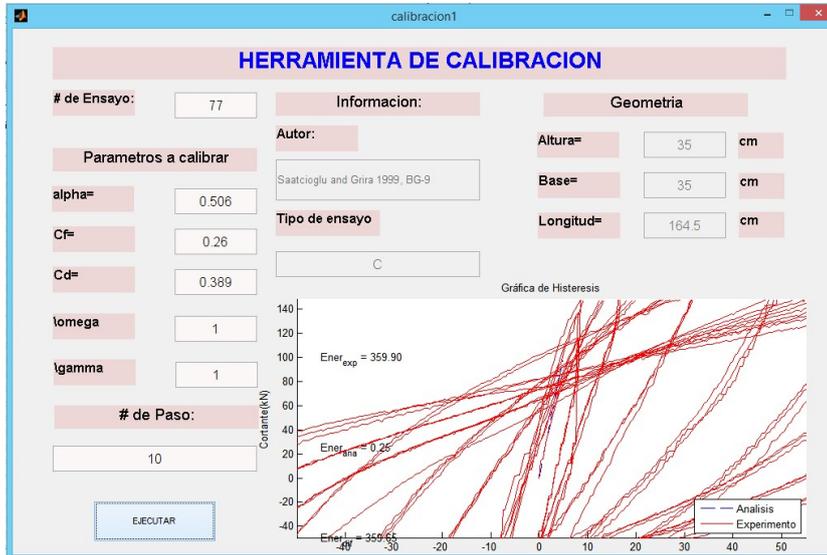
Antes de Calibrar



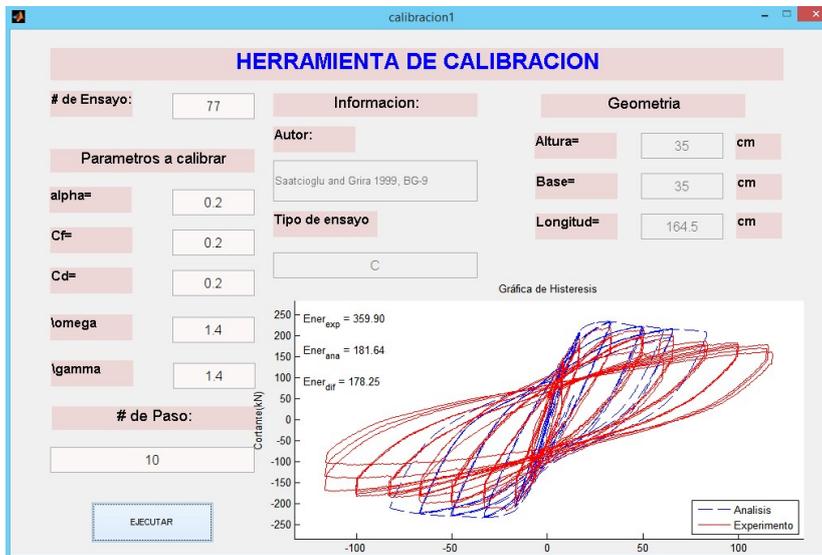
Después de Calibrar



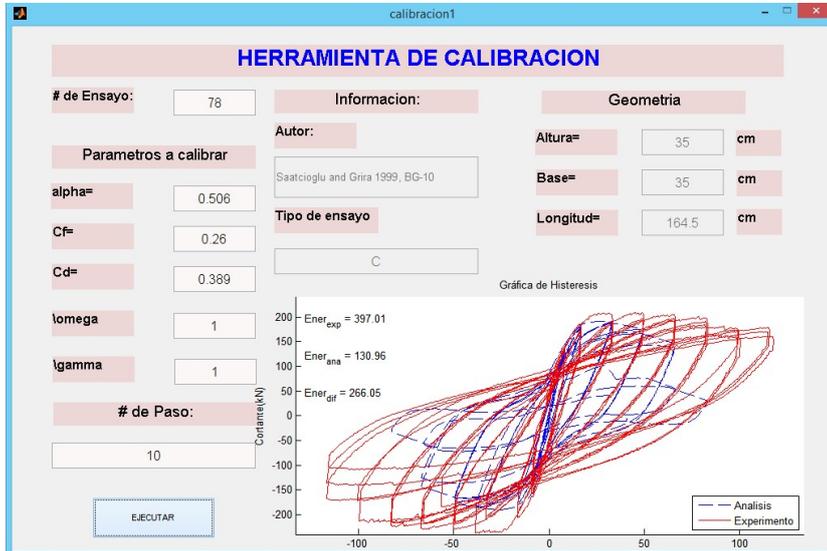
Antes de Calibrar



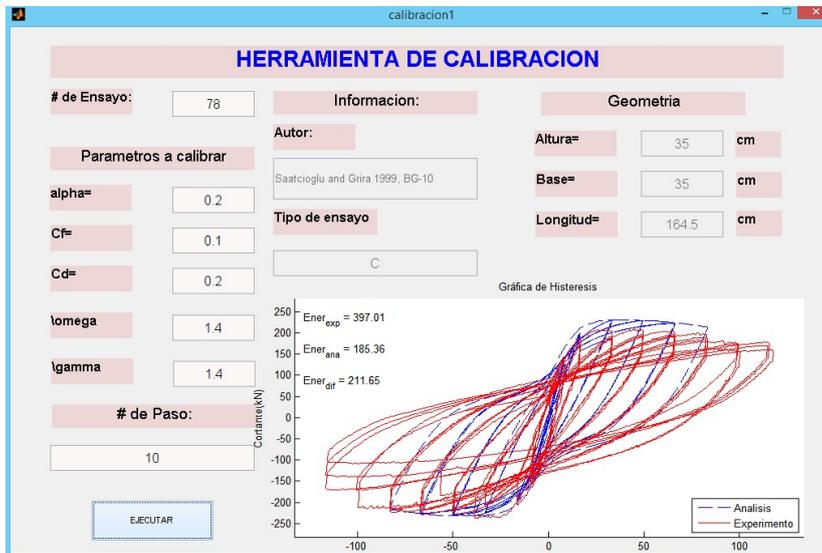
Después de Calibrar



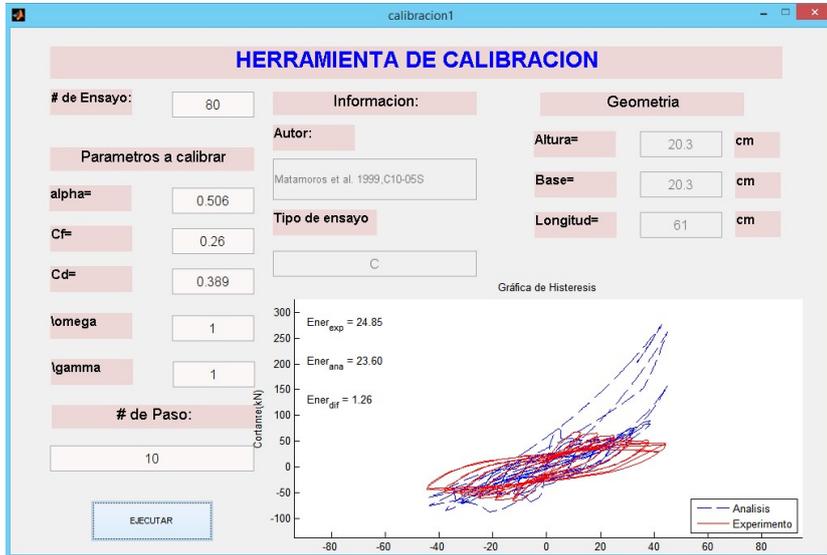
Antes de Calibrar



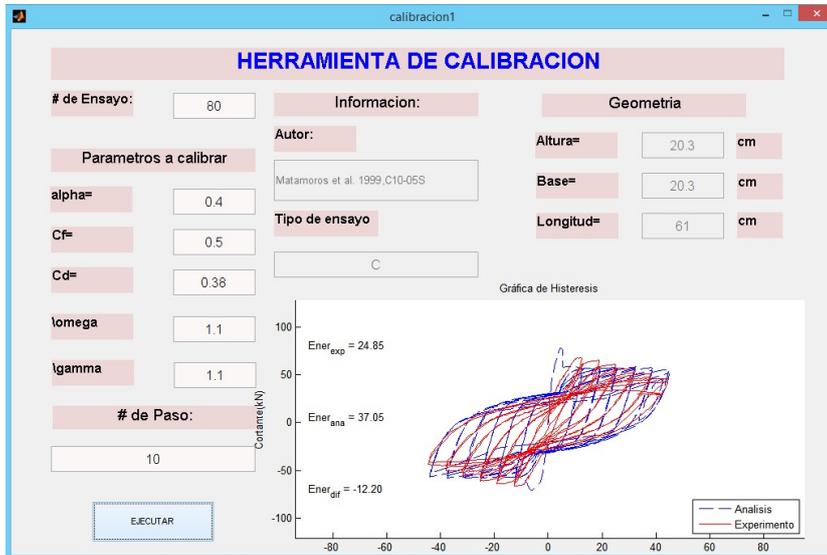
Después de Calibrar



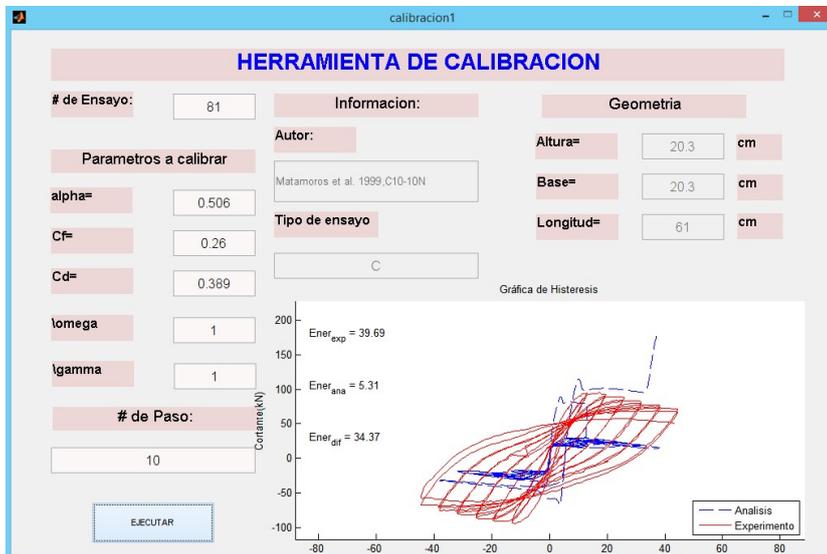
Antes de Calibrar



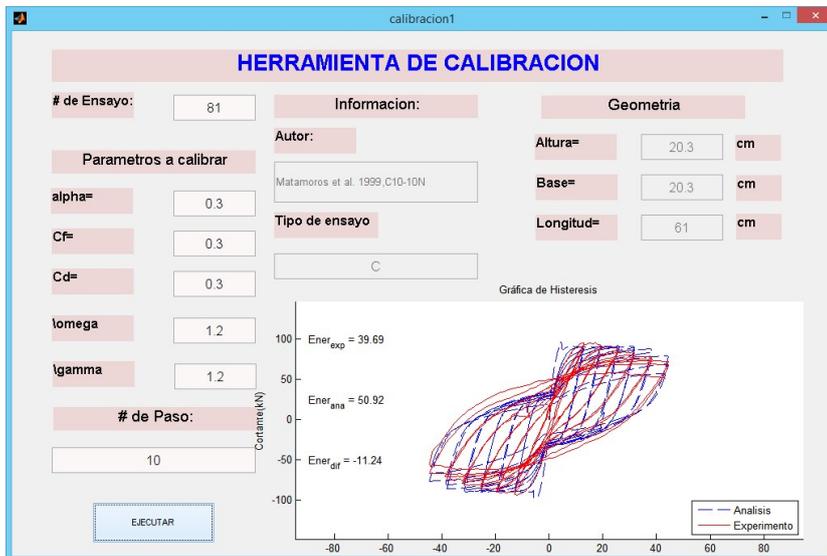
Después de Calibrar



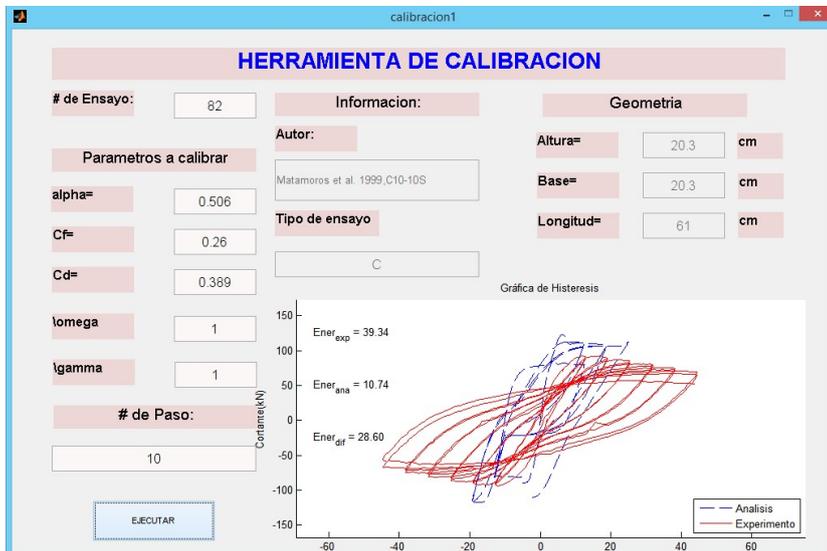
Antes de Calibrar



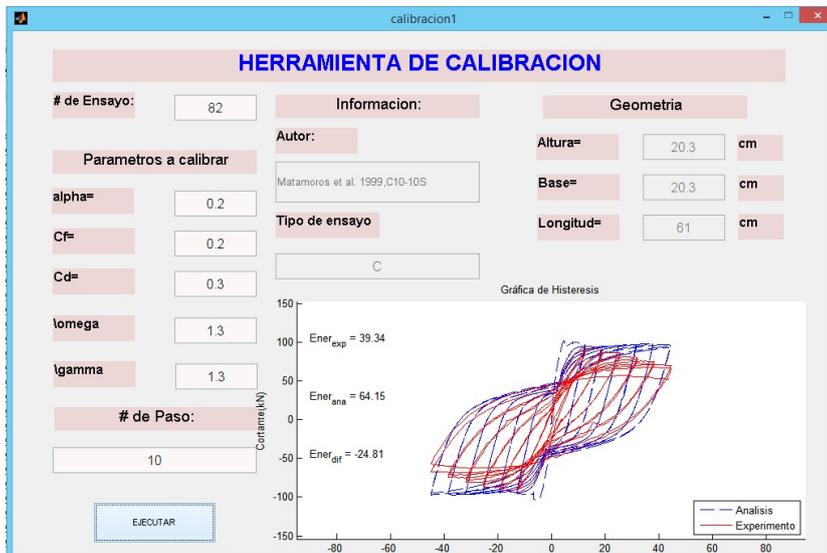
Después de Calibrar



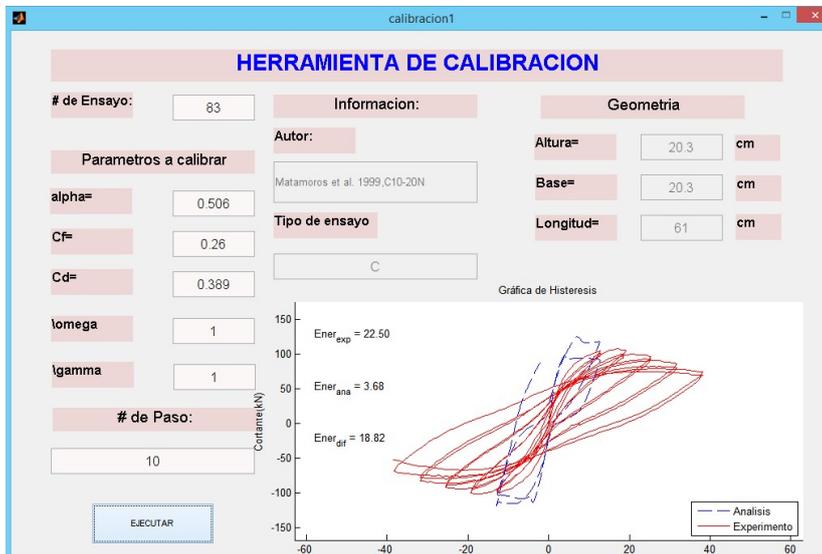
Antes de Calibrar



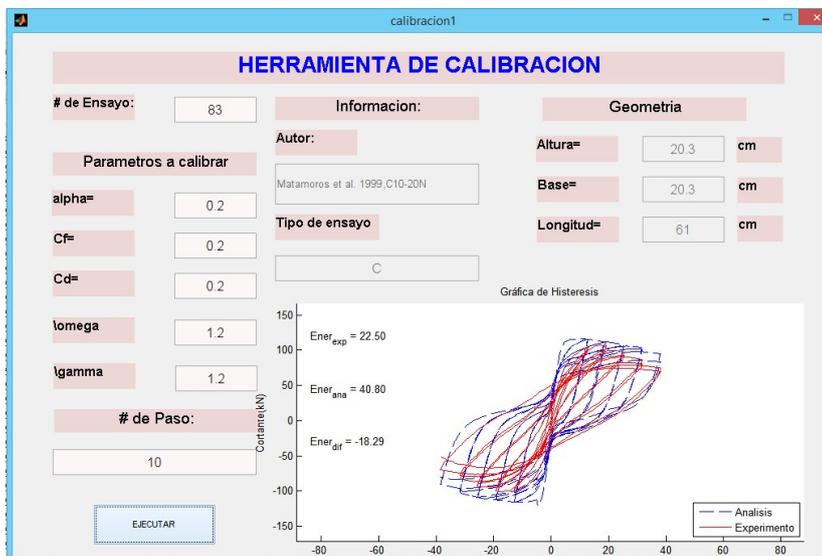
Después de Calibrar



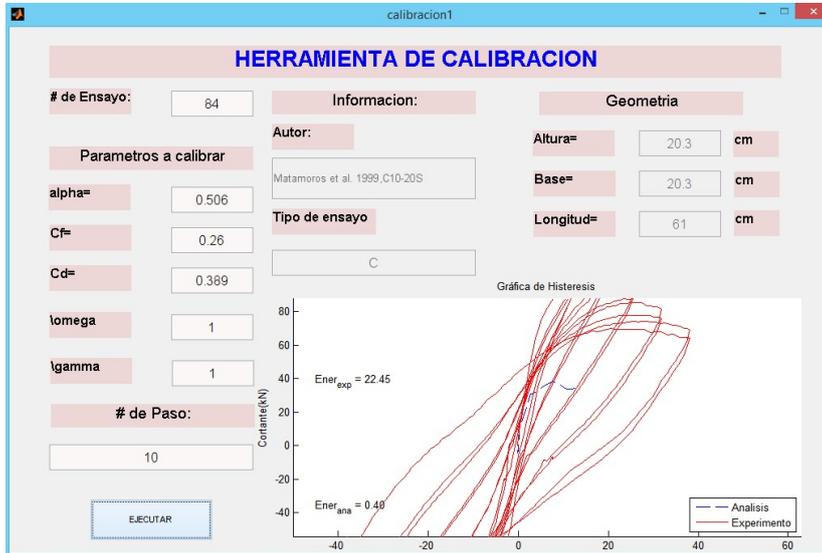
Antes de Calibrar



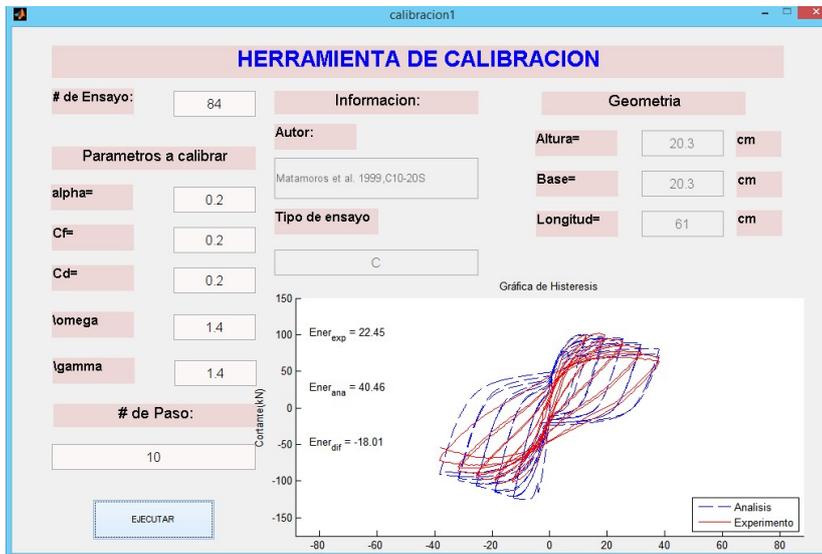
Después de Calibrar



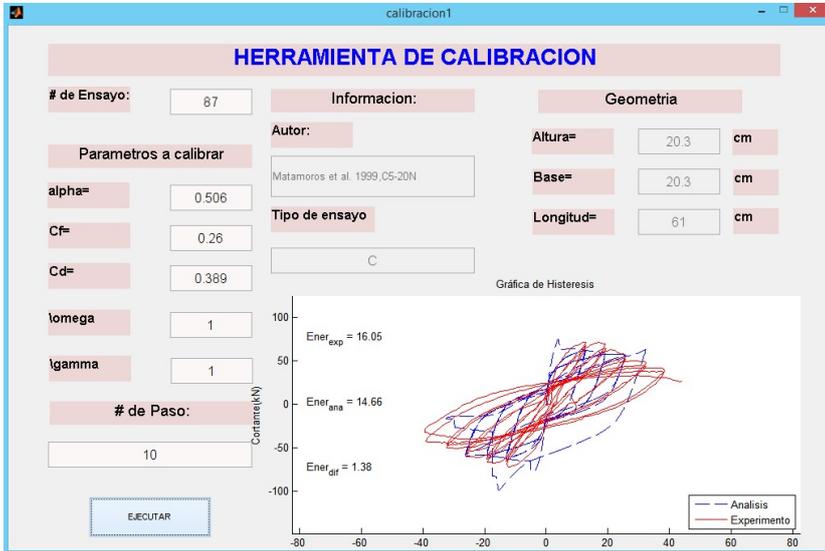
Antes de Calibrar



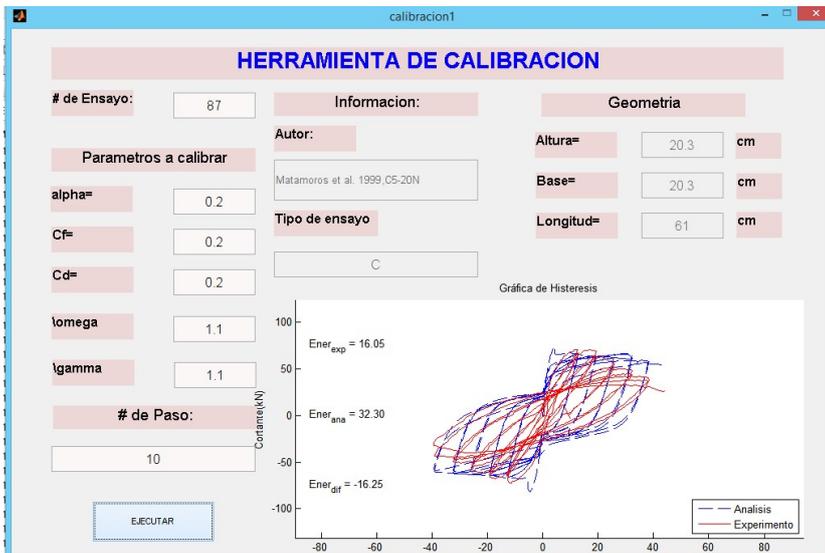
Después de Calibrar



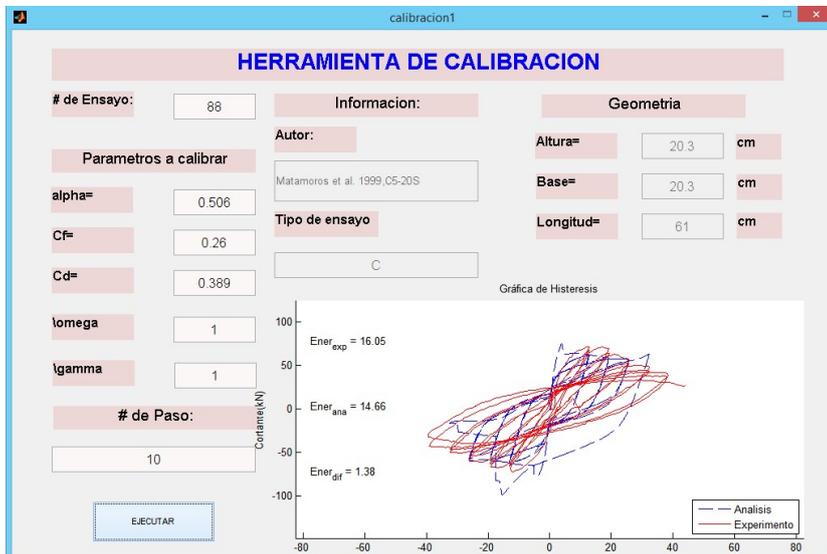
Antes de Calibrar



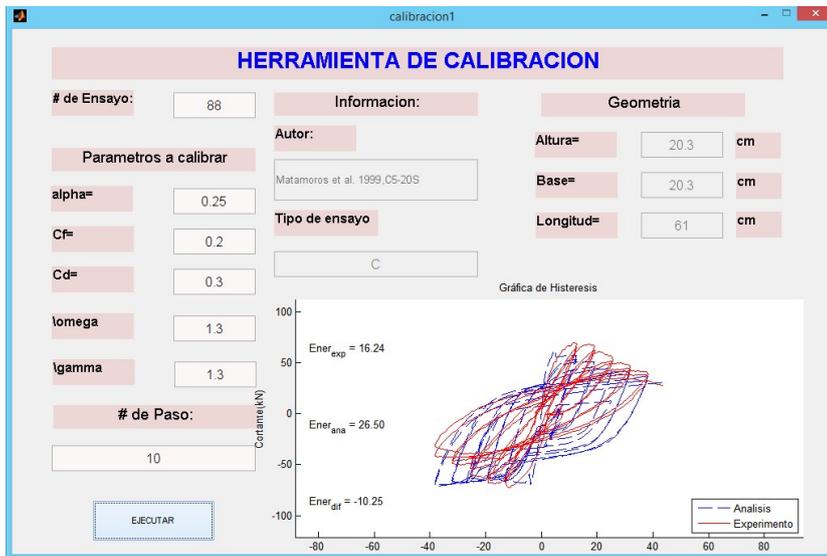
Después de Calibrar



Antes de Calibrar



Después de Calibrar





Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, ENRIQUE SEBASTIÁN YÉPEZ CARDENAS, con C.C: # 0919829945 autor del trabajo de titulación: **CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE FIBRAS DE HORMIGÓN ARMADO NO-LINEAL PARA INCLUIR LOS EFECTOS DE DEGRADACIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO-PARTE 2**, previo a la obtención del título de **INGENIERO CIVIL** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 25 de marzo del 2016

f. _____
Nombre: ENRIQUE SEBASTIÁN YÉPEZ CÁRDENAS
C.C: 0919829945

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TÍTULO Y SUBTÍTULO:	CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE FIBRAS DE HORMIGÓN ARMADO NO-LINEAL PARA INCLUIR LOS EFECTOS DE DEGRADACIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO PARTE 2		
AUTOR(ES)	YÉPEZ CÁRDENAS, ENRIQUE SEBASTIÁN		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	ING. BARROS CABEZAS, JOSÉ ANDRÉS		
INSTITUCIÓN:	UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL		
FACULTAD:	FACULTAD DE INGENIERÍA		
CARRERA:	INGENIERÍA CIVIL		
TÍTULO OBTENIDO:	INGENIERO CIVIL		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	29 DE MARZO DEL 2016	NO. DE PÁGINAS:	112
ÁREAS TEMÁTICAS:	ESTRUCTURAS		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	CALIBRACIÓN, COEFICIENTES DE CONFFIN-MASON, OPENSEES REINFORCING STEEL, DEGRADACIÓN, CARGA CÍCLICA.		
RESUMEN/ABSTRACT	<p>En el siguiente trabajo de titulación se plantea el desarrollo de una Metodología para calibrar los parámetros de degradación y resistencia del acero de refuerzo longitudinal de un elemento viga-columna, el cual está sometido a cargas cíclicas. Los parámetros que se calibraron corresponden a los coeficientes de Coffin-Mason establecidos en el Software Opensees en el comando Reinforcing Steel. Se calibra un modelo de fibras de hormigón armado no-lineal, de manera que se pueda incluir los efectos de degradación y de la interacción de cargas de flexión con carga axial. Este trabajo corresponde a la segunda parte de una investigación que tiene la finalidad de desarrollar ecuaciones que definan los parámetros de degradación, para poder modelar cualquier tipo de elemento viga-columna, en función de la geometría, armadura y resistencia de los materiales. Se define esta metodología para la calibración de los modelos constitutivos, realizándose la calibración de 88 ensayos, mediante la utilización de la herramienta computacional creada por el Ing. Alejandro Condo durante el desarrollo de la primera parte de la investigación.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: 0989169677	E-mail: enriqueyepes_sebastian@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:	Nombre: ING. JOSÉ BARROS		
	Teléfono: 0993265998		
	E-mail: jose.barros@cu.uscg.edu.ec		

SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA	
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):	
Nº. DE CLASIFICACIÓN:	
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):	